ISSN 1849-0638

ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS

24. SKUP O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI
24th NATURAL GAS, HEAT AND WATER CONFERENCE

17. MEĐUNARODNI SKUP O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI
17th INTERNATIONAL NATURAL GAS, HEAT AND WATER CONFERENCE

University of Slavonski Brod
Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod
HR-35000 Slavonski Brod, Trg I. B. Mažuranić 2

HEP-Group
HEP-Plin Ltd.
HR-31000 Osijek, Cara Hadrijana 7

HEP-Group
HEP-OPSKRBA PLINOM Ltd.
HR-31000 Osijek, Cara Hadrijana 7

University of Pécs
Faculty of Engineering and Information Technology
H-7624 Pécs, Boszorkány u. 2

PLIN2026
konferencija-plin.unisb.hr

Suorganizator
Co-organizer

HERA

Uz potporu
Supported by

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i mladih Republike Hrvatske
Ministry of Science, Education and Youth of the Republic of Croatia

Osijek, 23.09.- 25.09.2026.

PLIN 2026

ZBORNIK RADOVA 17. MEĐUNARODNOG SKUPA O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI

PROCEEDINGS OF 17th INTERNATIONAL NATURAL GAS, HEAT AND WATER CONFERENCE

Izdavač / Publisher: Sveučilište u Slavonskom Brodu
Email: plin@unisb.hr
URL: https://konferencija-plin.unisb.hr/

All papers are reviewed.
The authors are only responsible for the contents and accuracy of all published material. The Editors do not accept any liability for the contents and accuracy of articles, or responsibility for any mistakes (editorial or typographical), nor for any consequences that may arise from them.

Urednici / Editors:

Pero RAOS, glavni urednik
Dražan KOZAK
Andrijana MILINOVIĆ
Marija RAOS
Josip STOJŠIĆ
Igor SUTLOVIĆ
Zlatko TONKOVIĆ

PLIN 2026 Organizacijski odbor / PLIN 2026 Organization committee:

Josip STOJŠIĆ, Hrvatska, predsjednik organizacijskog odbora
Dávid CSONKA, Mađarska
Josip CUMIN, Hrvatska
Miroslav DUSPARA, Hrvatska
Renata ĐEKIĆ, Hrvatska
Nada FLANJAK ROŠOCI, Hrvatska
Hrvoje GLAVAŠ, Hrvatska
Ismeta HASANBEGOVIĆ, BiH
Zvonimir KLAIĆ, Hrvatska
Miroslav MAZUREK, Hrvatska
Gabriella MEDVEGY, Mađarska
Mirjana Mia PODGAJAC, Hrvatska
Pero RAOS, Hrvatska
Igor SUTLOVIĆ, Hrvatska
Zlatko TONKOVIĆ, Hrvatska
Gyula Ferenc VASVARI, Mađarska
Nikola VIŠTICA, Hrvatska

Sponzori / Sponsors

PPD

Axis.
Applied Connectivity.

Izlagači / Exhibitors

Beretta

JUPICO

PLIN 2026 Počasni odbor / PLIN 2026 Honor committee:

Ivan SAMARDŽIĆ, predsjednik, Hrvatska
Drago ŠUBARIĆ, Hrvatska
Márk Balázs ZAGORÁCZ, Mađarska
Damir PEĆUŠAK, Hrvatska
Branimir VUKOVIĆ, Hrvatska
Tomislav ŠAMBIĆ, Hrvatska

PLIN 2026 Programski odbor / PLIN 2026 Program committee:

Goran ŠIMUNOVIĆ, predsjednik, Hrvatska
Antun STOIĆ zamjenik pred., Hrvatska
Bálint BACHMANN, Mađarska
Darko BAJIĆ, Crna Gora
Eraldo BANOVAC, Hrvatska
Károly BELINA, Mađarska
Ivan BOŠNJAK, Hrvatska
Aida BUČO-SMAJIĆ, BiH
Zlatan CAR, Hrvatska
Robert ČEP, Češka
Majda ČOHODAR, BiH
Darko DAMJANOVIĆ, Hrvatska
Ejub DŽAFEROVIĆ, BiH
Antun GALOVIĆ, Hrvatska
Hrvoje GLAVAŠ, Hrvatska
Nenad GUBELJAK, Slovenija
Sergej HLOCH, Slovačka
Nedim HODŽIĆ, BiH
Željko IVANDIĆ, Hrvatska
Željka JURKOVIĆ, Hrvatska
Mirko KARAKAŠIĆ, Hrvatska
Ivica KLADARIĆ, Hrvatska
Milan KLJAJIN, Hrvatska
Janez KOPAČ, Slovenija
Dražan KOZAK, Hrvatska
Grzegorz KROLCZYK, Poljska
Stanislaw LEGUTKO, Poljska
Leon MAGLIĆ, Hrvatska
Predrag MARIĆ, Hrvatska
Siniša MARIČIĆ, Hrvatska
Gabriella MEDVEGY, Mađarska
Andrijana MILINOVIĆ, Hrvatska
Damir MILJAČKI, Hrvatska
Mladomir MILUTINOVIĆ, Srbija
Ferenc ORBÁN, Mađarska
Branimir PAVKOVIĆ, Hrvatska
Denis PELIN, Hrvatska
Miroslav PLANČAK, Srbija
Dalibor PUDIĆ, Hrvatska
Marijan RAJSMAN, Hrvatska
Miomir RAOS, Srbija
Pero RAOS, Hrvatska
Alessandro RUGGIERO, Italija
Aleksandar SEDMAK, Srbija
Marinko STOJKOV, Hrvatska
Josip STOJŠIĆ, Hrvatska
Ana SUTLOVIĆ, Hrvatska
Igor SUTLOVIĆ, Hrvatska
Tomislav ŠARIĆ, Hrvatska
Mladen ŠERCER, Hrvatska
Damir ŠLJIVAC, Hrvatska
Zlatko TONKOVIĆ, Hrvatska
Ivan VIDAKOVIĆ, Hrvatska
Zdravko VIRAG, Hrvatska
Nikola VIŠTICA, Hrvatska
Jurica VRDOLJAK, Hrvatska
Marija ŽIVIĆ, Hrvatska

Sadržaj / Contents

POZVANO PREDAVANJE / INVITED LECTURE

OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF CABLE LADDER STRUCTURAL ELEMENTS .. 1
Marko Cmuk, Mirko Karakašić, Ivan Grgić, Hrvoje Glavaš

ANALYSIS OF COGENERATION PLANT OPERATION UNDER VARYING OUTDOOR TEMPERATURES ON THE COLDEST DAY OF THE YEAR 14
Andrija Jakovčević, Igor Sutlović

ENGINEERING ASSESSMENT OF THE TRANSITION TO FULL BEV PASSENGER CAR MOBILITY AND THE POTENTIAL ROLE OF LPG 25
Marinko Barukčić, Hrvoje Glavaš

PLIN I PLINSKA TEHNIKA / GAS AND GAS TECHNIQUE

CLIMATE CHANGE AND NATURAL GAS 36
Siniša Franjić

PROIZVODNJA BIOMETANA U FUNKCIJI ZELENE ENERGETSKE TRANZICIJE 44
Krešimir Marijanović, Dalibor Pudić, Dalibor Bukvić, Igor Grozdanić, Marinko Stojkov

UTJECAJ DODATKA VODIKA PRIRODNOM PLINU NA TRANSPORTNE MOGUĆNOSTI MAGISTRALNOG PLINOVODA 57
Ivan Korade, Antun Barac, Zdravko Virag

DOPRINOSI ZDRAVKA FADLJEVIĆA RAZVOJU PLINOFIKACIJE SLAVONSKE REGIJE 66
Milan Ivanović

ENERGETIKA I TOPLINSKA TEHNIKA / ENERGETICS AND HEATING TECHNIQUE

IOT SUSTAVI ZA NADZOR KVALITETE ZRAKA I ENERGETSKE UČINKOVITOSTI U PROCESNOJ INDUSTRIJI 76
Siniša Švoger, Zoran Busija, Mato Perić, Tanja Tomić

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA INTEGRACIJE FOTONAPONSKE ELEKTRANE I KOGENERACIJE U POSTROJENJU DRVNE INDUSTRIJE 86
Renata Pavlović, Ružica Kljajić, Krešimir Fekete, Predrag Marić

INFLUENCE OF PV FAULT RIDE-THROUGH ON THE STABILITY OF BULK POWER SYSTEM 104
Nikolina Mršo, Predrag Marić, Ružica Kljajić, Krešimir Fekete

UTJECAJ LOKACIJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA EKONOMSKU ISPLATIVOST ... 119
Denis Katarina, Slaven Kaluđer, Kresimir Fekete, Ružica Kljajić

UTJECAJ TOPLINSKIH MOSTOVA NA PRORAČUN PROJEKTNOG TOPLINSKOG OPTEREĆENJA OBITELJSKIH KUĆA 134
Matej Đuranović, Dominik Ćaćić, Mateo Damjanović, Vjenceslav Damičević, Marinko Stojkov, Marija Živić

EKONOMSKA ANALIZA ISPLATIVOSTI FN ELEKTRANA U MODELU PREMA KOLIČINI PREUZETE I PREDANE ENERGIJE U HRVATSKOJ OD 2026. GODINE 141
Mladen Bošnjaković, Marija Stoić, Maja Čuletić Čondrić, Antun Stoić

DOPRINOSI VLADIMIRA TOMIĆA RAZVOJU PODUZEĆA „ELEKTROSLAVONIJA“ (OSIJEK) I PLINOFIKACIJI SLAVONSKE REGIJE..... 152
Milan Ivanović

DOPRINOSI VLADIMIRA ŽANIĆA RAZVOJU PODUZEĆA „ELEKTROSLAVONIJA“ OSIJEK... 162
Milan Ivanović

ENERGY FOOTPRINT OF COLOUR: INTEGRATING COLOUR SCIENCE INTO ENERGY-EFFICIENT TEXTILE PROCESSING 171
Martina Glogar

URBANIZAM, GRADITELJSTVO I REGULATIVA / URBAN PLANNING, CONSTRUCTION AND REGULATIONS

STRUČNI PREGLEDI ZA ODLUČIVANJE O MJERAMA OBNOVE ZGRADA 180
Vidaković Držislav, Hadzima-Nyarko Marijana, Lozančić Silva, Jurić Aleksandar

HIDRAULIČKA FUNKCIJA VODOSPREMA U SUVREMENIM VODOOPSKRBNIM MREŽAMA..... 189
Marija Šperac, Marija Ilišević

ZASTUPLJENOST TEMA ODRŽIVOSTI U VISOKOM OBRAZOVANJU U PODRUČJU GRAĐEVINARSTVA I ARHITEKTURE 199
Dino Obradović

STAMBENI FOND GRADA OSIJEKA: STATISTIČKA OBRADA IZGRADNJE I KVALITATIVNA PROCJENA PROSTORNIH RIZIKA 211
Melani Anušić, Anja Dujak, Martina Katavić, Dino Obradović, Josip Radić

RAZVOJ METODOLOŠKOG OKVIRA ZA VREDNOVANJE ODRŽIVOSTI GRAĐEVINSKIH MATERIJALA KROZ ŽIVOTNI CIKLUS 221
Mihaela Domazetović, Dino Obradović, Hrvoje Krstić

OBVEZE I MOGUĆNOSTI VOĐENJA DIGITALNE GRADILIŠNE DOKUMENTACIJE 229
Vidaković Držislav, Bošnjak Jovan, Hećimović Dražen, Pavelić Krešimir

ELECTROMAGNETIC FIELD TRANSMISSION THROUGH MODERN BUILDING MATERIALS: A COMPARATIVE STUDY OF CONCRETE AND BRICK..... 240
Vanja Mandrić, Slavko Rupčić, Luka Filipović, Josip Spišić

OPASNOST URBANIH POPLAVA SLAVONSKE PODRAVINE 251
Siniša Maričić, Lovren Iličić

KONSTRUIRANJE I PROIZVODNE TEHNOLOGIJE / DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGIES

USPOREDBA OTPORNOSTI NA TROŠENJE PREVLAKA NA BAZI W KARBIDA I Cr KARBIDA NANESENIH HVOF POSTUPKOM TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA 261
Ivan Vidaković, Katica Šimunović, Goran Pačarek, Goran Rozing

PRIMJENA 3D SKENIRANJA I REVERZIBILNOG INŽENJERINGA U REKONSTRUKCIJI POKLOPCA MIKRORAČUNALA 272
Siniša Švoger, Zoran Busija, Zlatko Botak, Dino Lukman

OTPORNOST PREMAZA NA ABRAZIJSKO TROŠENJE 282
Tomislav Šolić, Dejan Marić, Slaven Suhi, Robert Cipar, Ivan Samardžić

DIZAJN PAMETNE SVJETILJKE TEMELJEN NA TENZIGRACIJSKOJ STRUKTURI UZ PRIMJENU ADITIVNE PROIZVODNJE 290
Luka Bićanić, Doris Stavljenić, Josip Groš, Dean Fraj

SIZING CRANE RUNWAY BEAMS FOR MINIMUM WEIGHT 300
Sándor Fenyvesi, Ferenc Orbán

COST MODELLING OF COLD METAL TRANSFER WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING OF ALUMINIUM COMPONENTS 310
Gyula Ferenc Vasvári, David Csonka, Ivan Samardžić, Josip Stojšić

ODREĐIVANJE MATERIJALNOG I EKONOMSKOG POTENCIJALA RECIKLIČNOSTI ODBAČENIH ŽARULJA 320
Mihaela Živković, Goran Rozing, Dalibor Buljić, Ivan Vidaković

DEVELOPMENT OF AN ESP32-BASED IOT DIDACTIC POWER TRANSMISSION RIG AND ITS APPLICATION IN LABORATORY TEACHING 330
Tomislav Solar, Ivan Grgić, Mirko Karakašić, Jure Marijić, Jubayer Ahmed Sajid, Vivek Kumar Tiwary

POLYMER HYDROGELS AS ADVANCED MULTIFUNCTIONAL MATERIALS 340
Ljerka Kratofil Krehula, Emi Govorčin Bajsić, Ana Šaravanja, Igor Sutlović

PRIMJENA TEHNIČKIH MATERIJALA U SUSTAVIMA ZA ISKORIŠTAVANJE ENERGIJE MORA 347
Slavica Kladarić, Petar Ramljak, Ivica Kladarić

PIERCING AND CUTTING AND PIERCING AND CUTTING MACHINES 357
Branko Grizelj, Miroslav Duspara, Mario Jagnjić, Pavo Jelić, Mirela Lipovac Arelić, Marija Stoić, Valnea Starčević, Božidar Kovačević, Slaven Suhi, Marin Vidačić

KONTROLA KVALITETE POLIMERNIH KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERA IZRAĐENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA 368
Antonio Jurša , Josip Groš , Pero Raos, Josip Stojšić

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF INFILL DENSITY AND INFILL GEOMETRY ON THE TENSILE STRENGTH OF PLA STRUCTURES FILLED WITH PHOTOPOLYMER RESIN 378
Luka Brčić , Ivan Grgić , Jure Marijic , Mirko Karakašić , Mohammad Khalid Hasan Nabil

REMONT MOBILNOG POSTROJENJA ZA EKSPLOATACIJU UGLJIKOVODIKA 389
Tomislav Šarić, M Došlović, Roberto Lujić, Kristian Katić

Optimization of design parameters of cable ladder structural elements

M. Cmuk[1], M. Karakašić[2,*], I. Grgić[2], H. Glavaš[3]

[1]Sveučilište Sjever, Odjel za strojarstvo, Varaždin, Hrvatska
[2]Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, Hrvatska
[3]Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, Hrvatska

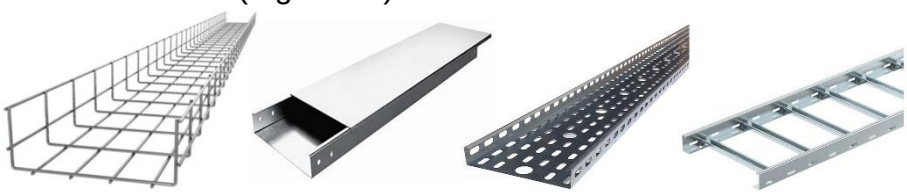
[*]Autor za korespodenciju. E-mail: mkarakasic@unisb.hr

Abstract
Cable trays are systems that, given today's growing demand for electricity, provide an effective solution that enables the organization and protection of cables. Therefore, the paper analyzes the effects of the design parameters of height, width and wall thickness on reducing the mass and improving the load-bearing capacity of cable ladders. By applying the finite element method (FEM), the aforementioned parameters were optimized on the structural elements of the crossbar and side rail. The achieved improvements, presented in this paper, are aimed at increasing the efficiency, safety and long-term sustainability of the design solution of cable ladders.

Key words: Cable management systems, Finite element method (FEM), Design process, Optimization

1. Introduction

In response to the increasing demand for electricity in households and industry, electrical cable and wiring management systems are continuously being optimized in terms of design to meet the demands for greater material savings, simpler installation and maintenance. Cable trays are one of the key elements of such systems. Their main function is to support, organize and protect the cables necessary for the efficient and safe management of electrical and communication networks. In terms of design, cable trays are divided into wire cable trays (Figure 1a), cable trays with a solid bottom (Figure 1b), channel cable trays (Figure 1c) and cable ladders (Figure 1d).



a) b) c) d)

Figure 1. Design versions of cable trays [1-4]

Cable ladders, in comparison to the three previously mentioned designs, are the strongest and most robust design for cable routing. They consist of two side rails that form longitudinal structural elements and crossbars as transverse structural elements (Figure 1d). They are made of stainless steel, aluminum, zinc-coated steel and fiber-reinforced polymers [5]. They are supported and mounted on various structures using ceiling (Figure 2a) and wall supports (Figure 2b), and the supports are made of the same material as the trays.

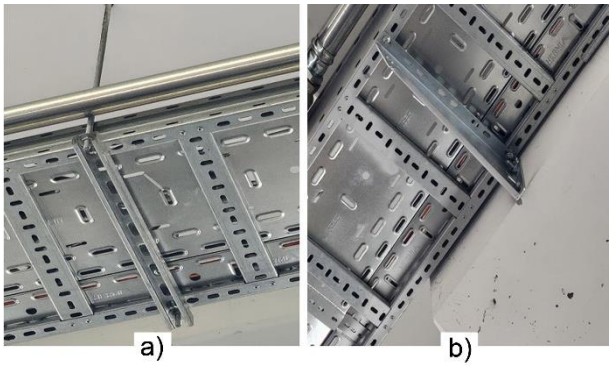


Figure 2. Design versions of the supports

The positioning of the supports on the cable ladder is prescribed by the standards HRN EN 61537:2007 and IEC 61537, where, due to the least influence of bending stress, 1/4 of the ladder span is designated for mounting the supports [6]. Due to their adaptability and wide application, cable ladders made of steel have space for improvement by applying optimization methods in order to reduce their mass, but also increase their load-bearing capacity. Therefore, in this paper, optimization of cable ladders with a span of 6000 mm, made of cold-rolled low-carbon steel, which according to DIN EN 10130 is designated DC01, was carried out. This steel is not suitable for high load-bearing capacities and high stresses [5]. Using Ansys Workbench [7] and direct optimization method, the structural elements of the side rail and the crossbar were optimized in order to reduce the mass of the structure and increase its load-bearing capacity. The optimization was performed on a cable ladder with a side wall height H = 100 mm, a crossbar width (length) W = 400 mm, a side rail length L = 6000 mm and a wall thickness S = 1,5 mm, i.e. 100×400×1,5×6000 mm (Figure 3). The objective function includes mass reduction of the structural elements and, if possible, increasing the load-bearing capacity of the cable ladder. Numerical calculations of the maximum equivalent von-Mises stresses and displacements on the side rail and crossbar structural elements were performed, using the finite element method and a tetrahedral finite element mesh.

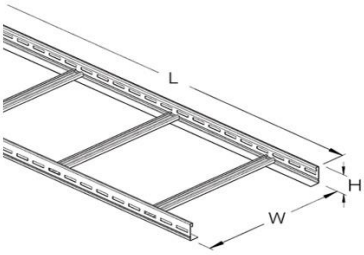


Figure 3. Cable ladder geometrical parameters

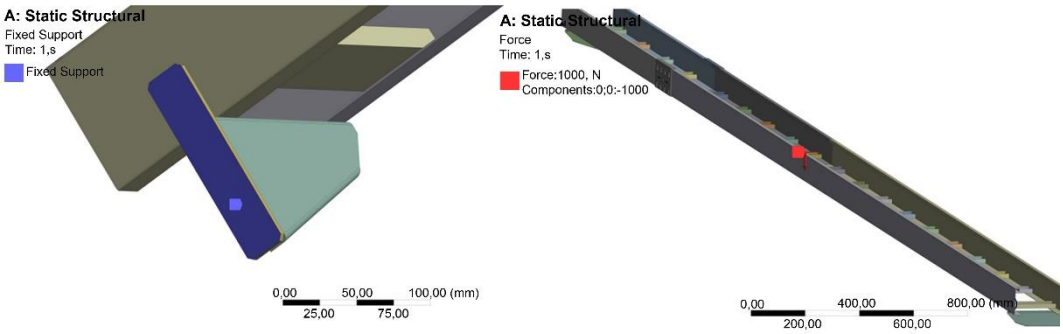
2. Initial numerical calculation of cable ladders

Initial calculation, using FEM, determined the maximum equivalent von-Mises stress and the maximum total displacement, in order to optimize the structural elements of the side rail and crossbar. The ladder material is DC01 steel, of which the mechanical properties are listed in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of DC01 steel [8]

Steel	DC01
Density (ρ), kg/dm^3	7,85
Module of elasticity (E), GPa	200
Yield strength (R_e), MPa	140 – 280
Tensile strength (R_m), MPa	270 – 410
Hardness, HV	105

For the purpose of the analysis of the load-bearing capacity of the ladder, the following values of the yield strength and tensile strength were used: R_e = 210 MPa, R_m = 340 MPa. The initial numerical calculation was performed on a ladder with dimensions of 100×400×1,5×6000 mm. When determining the boundary conditions, fixed supports were placed on wall supports that are in contact with the wall (Figure 4a). The force acting on the ladder structure, acts at half the length of the ladder (3000 mm from the edge). The amount of this force was determined by gradually increasing it until the maximum equivalent von Mises stress was equal to the yield strength of DC01 steel, i.e. R_e = 210 MPa. A cable ladder is actually a continuous beam subjected to a concentrated static load due to the mass of the cables. This load acts at a single point between the side rails with the amount of the 1000 N (Figure 4b).



a) b)

Figure 4. Boundary conditions and load on the ladder model 100×400×1,5×6000 mm

To facilitate the analysis of the load on the entire tray, the concentrated static load was converted into a uniform load. The finite element mesh was generated from tetrahedral finite elements of size 12 mm. The mesh size is 15664 elements and 290900 nodes. The initial calculation yielded the maximum equivalent von Mises stress of 198,12 MPa (Figure 5), while the maximum deflection (displacement) was 10,3 mm (Figure 6). The maximum allowable deflection is determined by the IEC 61537 standard, according to which the

maximum allowable deflection is 30 mm, i.e. the amount of the resulting deflection must not exceed *L*/200.

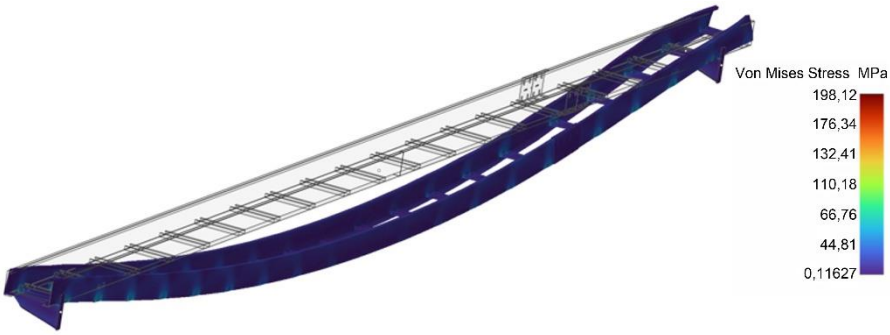


Figure 5. Maximum equivalent stress according to von Mises, MPa

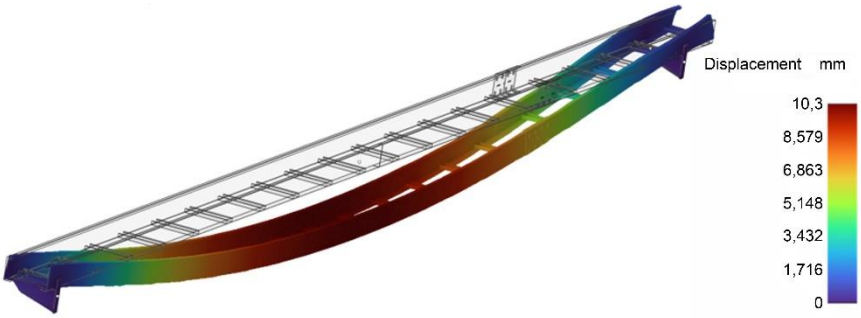
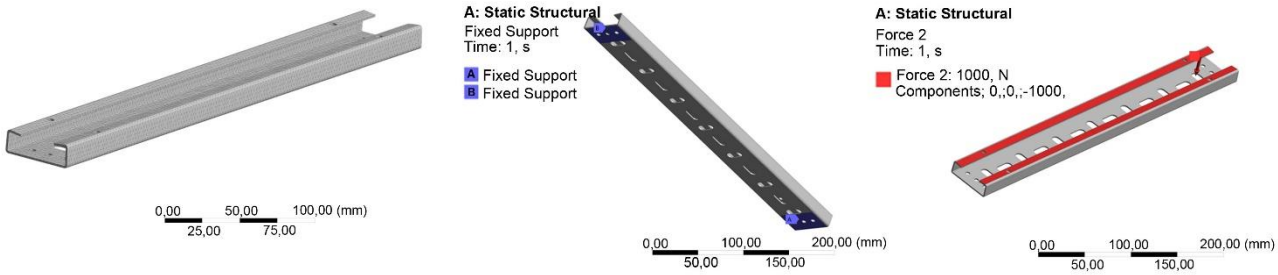


Figure 6. Maximum deflection, mm

3. Calculation of the load-bearing capacity of individual structural elements

The analysis of the load-bearing capacity of the crossbar and the side rail is included by the numerical calculation. With the calculation is determined the maximum equivalent stresses according to von Mises and the maximum deflection (displacement), so that their optimization could be carried out. The initial calculation of the crossbar was carried out by generating a tetrahedral finite element mesh consisting of 28628 elements and 58987 nodes (Figure 7a). Fixed supports were placed on the lower surfaces of the crossbar (Figure 7b). The upper surfaces of the crossbar were loaded with a force of 1000 N (Figure 7c).



a) b) c)

Figure 7. Finite element mesh, boundary conditions and crossbar loading

The maximum equivalent von Mises stress obtained using the initial calculation is 176,55 MPa (Figure 8), while the maximum total displacement (deflection) is 0,37714 mm (Figure 9). The mass of the crossbar model is 0,43462 kg.

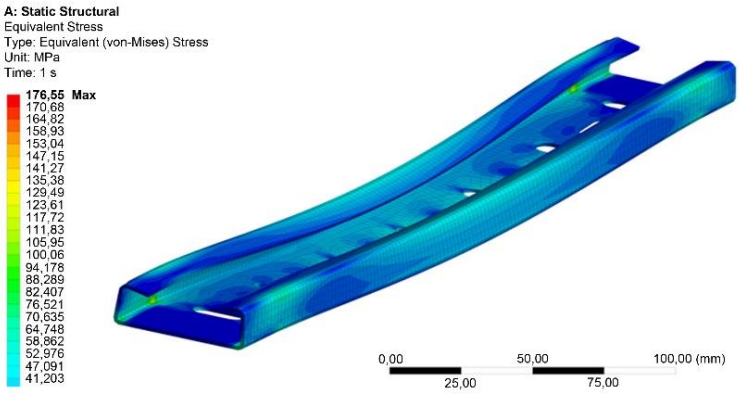


Figure 8. Maximum equivalent stress according to von Mises, MPa

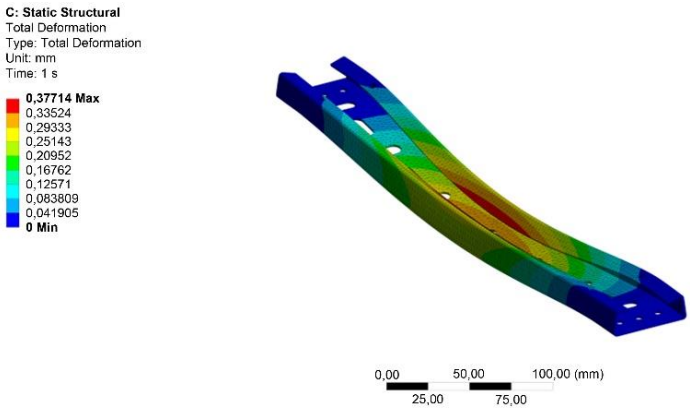


Figure 9. Maximum total displacement, mm

The initial calculation of the side rail was performed by generating a tetrahedral finite element mesh consisting of 30529 elements and 63595 nodes (Figure 10a). The fixed support was placed on the lower surface of the bottom wall (Figure 10b), and the movable support on the side surface of the bottom wall (Figure 10c). The upper surface of the bottom wall was loaded with a force of 1000 N (Figure 11). The initial calculation yielded the maximum equivalent stress according to von Mises of 209,07 MPa (Figure 12), while the maximum total displacement (deflection) was 12,973 mm (Figure 13). The mass of the sidewall model was 4,7723 kg.

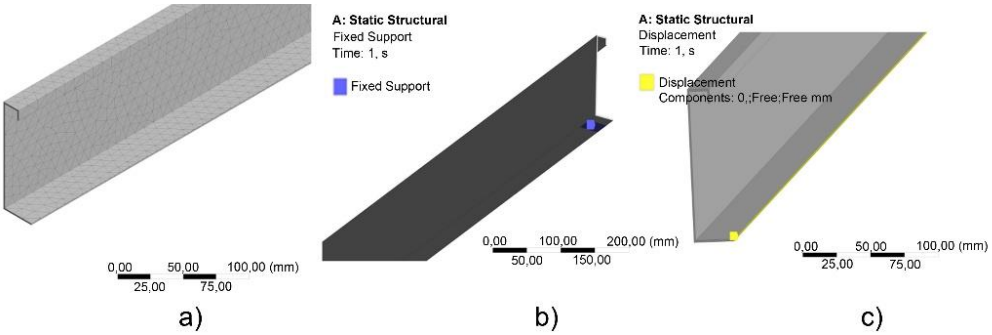


Figure 10. Finite element mesh and boundary conditions of the side rail

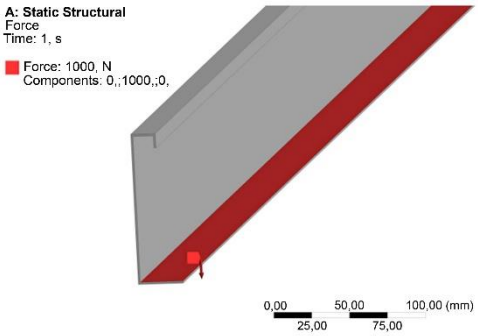


Figure 11. Loading of the side rail

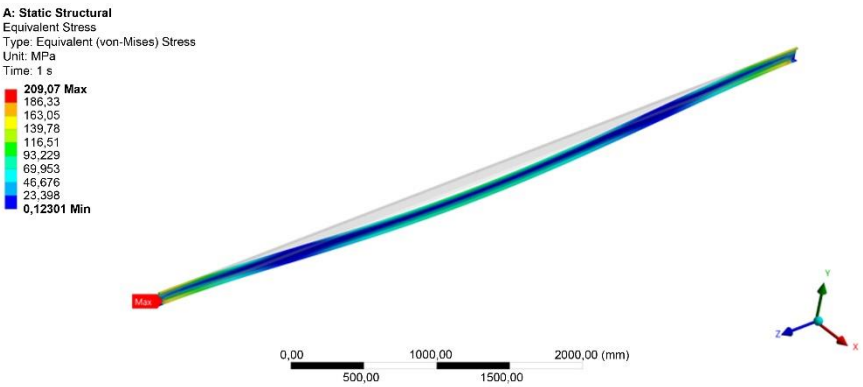


Figure 12. Maximum equivalent stress according to von Mises, MPa

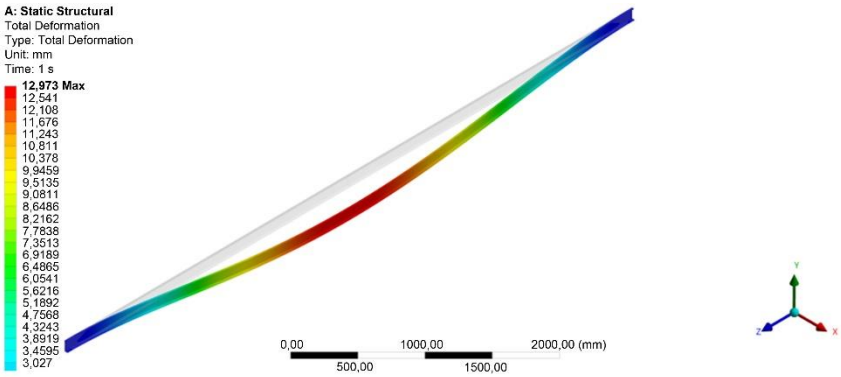


Figure 13. Maximum total displacement, mm

From the results of the initial numerical calculation performed on the crossbar and the side rail for the maximum equivalent von Mises stress and maximum total displacement, the crossbar element should be optimized to reduce its mass because it can withstand a greater load, while the side rail element should be optimized to increase its load-bearing capacity, i.e. the maximum equivalent von Mises stress should be reduced, provided that there is no significant increase in mass. If the mass of the crossbar is sufficiently reduced and the load-bearing capacity of the side rail is increased, the cable ladder will have a lower total mass and a higher load-bearing capacity compared to the initial structure.

4. Optimization of structural elements of the crossbar and side rail

Optimization of the crossbar was carried out in Ansys Workbench [7] by direct optimization method. The geometric parameters width (*P8*), height (*P9*) and wall thickness (*P10*) were selected as input parameters of the optimization process (Figure 14). The following initial values were used for the initial numerical calculation: *P8* = 50 mm, *P9* = 16 mm and *P10* = 1,5 mm. The intervals of the input parameter values within which their optimal values will be sought are shown in Figure 15.

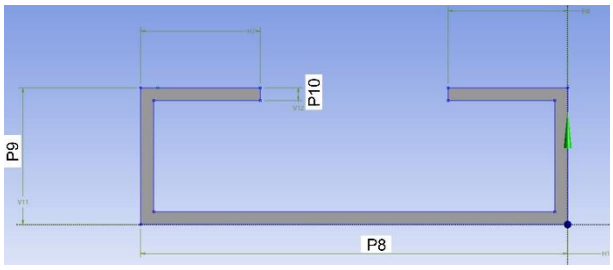


Figure 14. Geometric input parameters of the crossbar

Table of Schematic E2: Optimization

	A	B	C	D
1	Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P8 - width (mm)	38	52	
4	P9 - height (mm)	15	18	
5	P10 - wall_up (mm)	0,7	1,5	

Figure 15. Defining the boundary values of the crossbar input parameters

The output parameters are determined by the objective function (mass reduction) and constraints. The mass must not exceed 0,5 kg, with a preference for values close to 0,39 kg (Figure 16). The constraint with respect to the maximum equivalent von Mises stress must not exceed 210 MPa (Figure 16). This constraint is determined by the yield strength of the DC01 steel from which the structural elements of the cable ladders are made. The selected value of the preferred value for stress is 180 MPa. Deflection as a constraint was not taken into account, since the initial numerical calculation yielded small deflection values. The optimization was performed on a set of 100 samples, and three samples were selected whose input parameter values gave the best solutions for the given output parameters.
By analyzing the individual effects of input parameters on output variables, the wall thickness parameter (*P10*) has the greatest impact on the observed input variables (Figure 17).

Regardless of the fact that deflection as a constraint is excluded from the analysis, Figure 17 shows the impact of parameter *P10* on it as well.

Table of Schematic D2: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Parameter	Objective			Constraint			
2			Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	Minimize P3;P3<=210 MPa	P3 - Equivalent Stress Maximum	Minimize	180		Values<=Upper Bound		210	0,001
4	Minimize P5;P5<=0,5 kg	P5 - Solid Mass	Minimize	0,39		Values<=Upper Bound		0,5	0,001
*									

Figure 16. Output variables of the crossbar optimization model

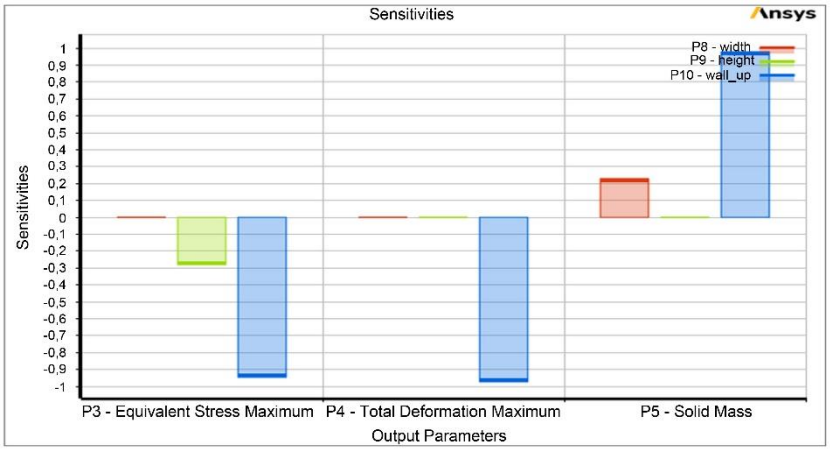


Figure 17. Sensitivity diagram of parameters *P8*, *P9* and *P10* to output variables

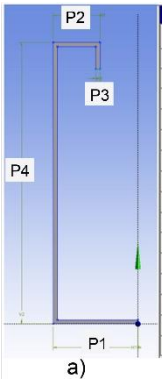
The sample that gave the best solution of the objective function is Candidate Point 1 (Figure 18) whose values of parameters *P8*, *P9* and *P10* had the greatest influence on the mass reduction, i.e. the mass is reduced by 28,18 % compared to the Initialy (Figure 18). Equally, there was an increase in the amount of the maximum equivalent stress according to von Mises by 11,46 % compared to the Initialy (Figure 18). It is visible that all three candidates had maximum stress values higher than the given preference value, but still less than 210 MPa. Finally, the values of parameters *P8*, *P9* and *P10* of Candidate Point 1 were rounded and the final solution is Optimization Solution 1 (Figure 18). This solution is the last adopted solution for optimizing the structural element of the crossbar. Therefore, the mass of the crossbar compared to the initial model was reduced by 28,01 % and amounts to 0,3129 kg, while the amount of maximum equivalent stress increased by 10,92 % and amounts to 195,82 MPa.

Table of Schematic E2: Optimization, Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Reference	Name	P8-width (mm)	P9-height (mm)	P10-wall_up (mm)	P3-Equivalent Stress Maximum (MPa)		P4-Total Deformation Maximum (mm)	P5-Solid Mass (kg)	
2						Parameter Value	Variation from Reference		Parameter Value	Variation from Reference
3		Candidate Point 1	42,41	17,921	1,1	196,79	11,46 %	0,65189	0,31214	-28,18 %
4		Candidate Point 2	39,05	17,64	1,2	192,53	9,05 %	0,53361	0,32606	-24,98 %
5		Candidate Point 3	47,45	17,288	1,1	198,57	12,47 %	0,68043	0,3237	-25,52 %
6		Initially DP2	50	16	1,5	176,55	0,00 %	0,38402	0,43462	0,00 %
7		Optimization Solution 1, DP1	42,5	18	1,1	195,82	10,92 %	0,651	0,3129	-28,01 %
*		New Custom Candidate Point	45	16,5	0,7					

Figure 18. Optimal values of the input parameters of the crossbar

The optimization of the side rail was carried out by selecting the following input parameters: width of the lower part (*P1*), width of the upper part (*P2*), thickness of the wall (*P3*) and height (*P4*) (Figure 19a). The initial numerical calculation was carried out according to their following values: *P1* = 30 mm, *P2* = 16,5 mm, *P3* = 1,5 mm and *P4* = 100 mm (Figure 19b). The intervals of values of the mentioned input parameters within which their optimal values will be sought are shown in Figure 20.



a)

Outline of All Parameters

	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Static Structural (A1)			
4	P1	width_lower part	30	mm
5	P2	width_upper part	16,5	mm
6	P3	wall	1,5	mm
7	P4	height	100	mm
*	New input parameter	New name	New expression	
9	Output Parameters			
10	Static Structural (A1)			
11	P5	Total Deformation Maximum	12,973	mm
12	P6	Equivalent Stress Maximum	209,07	MPa
13	P7	Solid Mass	4,7723	kg
*	New output parameter		New expression	
15	Charts			

b)

Figure 19. Input and output parameters of the side rail

Table of Schematic B2: Optimization

	A	B	C	D
1	Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P1-width_lower part (mm)	25	50	
4	P2-width_upper part (mm)	10	17	
5	P3-wall (mm)	0,8	2	
6	P4-height (mm)	100	200	

Figure 20. Defining the boundary values of the side rail input parameters

The results of the initial numerical calculation indicate the need to increase the load-bearing capacity of the side rail, and it is necessary to reduce the maximum equivalent von Mises stress, provided that there is no significant increase in mass. Therefore, a limit is set on the maximum equivalent stress, which must be less than 210 MPa with a target value of 150 MPa (Figure 21). It is to be expected, and this is evident from the results of the initial numerical calculation, that with a decrease in stress, there will be an increase in the mass of the side rail. Therefore, the mass must not exceed 6 kg with a target value of 5 kg (Figure 21). This analysis also includes a deflection limit set to a maximum of 15 mm (Figure 21).

Table of Schematic B2: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Parameter	Objective			Constraint			
2			Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	P5<=15 mm	P5-Total Deformation Maximum	No Objective			Values<=Upper Bound		15	0,001
4	Minimize P6;P6<=210 MPa	P6-Equivalent Stress Maximum	Minimize	150		Values<=Upper Bound		210	0,001
5	Minimize P7;P7<=6 kg	P7-Solid Mass	Minimize	5		Values<=Upper Bound		6	0,001
*		Select a Parameter							

Figure 21. Output variables of the side rail optimization model

The optimization was performed on a set of 100 samples. Two samples, or eleven dimensional combinations, did not provide a solution because they did not meet the set constraints. From the remaining 98 samples, three solutions were selected that best met the set conditions. For the Candidate Point 1 solution, for the obtained values of the input

parameters, a reduction of the maximum equivalent stress of 3,70 % was achieved compared to the initial model, while the mass was reduced by 13,57 % (Figure 22). Therefore, it can be concluded that the reduction in maximum equivalent stress, relative to the reduction in mass, is negligible.

Table of Schematic B2: Optimization, Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Reference	Name	P1-width_lower part (mm)	P2-width_upper part (mm)	P3-wall (mm)	P4-height (mm)	P5 Total Deformation Maximum (mm)		P6-Equivalent Stress Maximum (MPa)		P7-Solid Mass (kg)	
2							Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3		Candidate Point 1	40,126	11,676	1,1023	110,1	12,488	-3,74 %	201,33	-3,70 %	4,1249	-13,57 %
4		Candidate Point 2	43,125	10,527	0,92452	158,1	6,8104	-47,50 %	147,06	-29,66 %	5,3897	12,52 %
5		Candidate Point 3	39,375	14,301	0,96896	146,1	7,4001	-42,96 %	165,98	-20,61 %	5,1373	7,85 %
6		Initial DP0	30	16,5	1,5	100	12,973	0,00 %	209,07	0,00 %	4,7723	0,00 %
*		New Custom Candidate Point	37,5	13,5	1,4	150						

Figure 22. Side rail parameter values of the first optimization cycle

Parameters *P3* and *P4* have the greatest impact on all three output variables (Figure 23). Accordingly, a second optimization cycle was performed, with respect to Candidate Point 1 (Figure 22), whereby the determination of the lower and upper bounds of the input parameters (Figure 24) was performed according to their impact on the output variables, taking into account the interval values set in the first optimization cycle. The second optimization cycle was performed on a set of 50 samples.

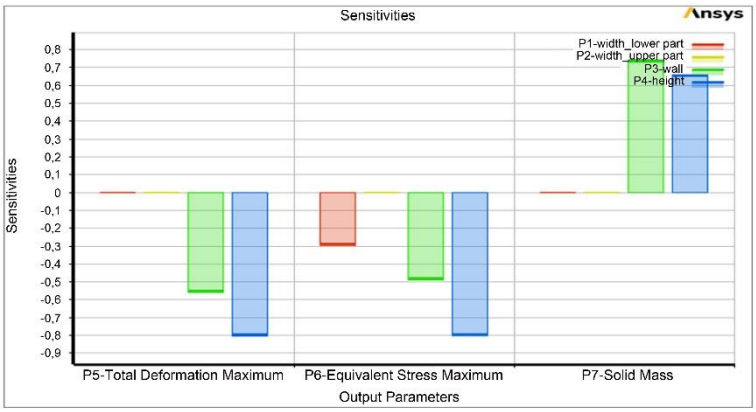


Figure 23. Sensitivity diagram of parameters *P1*, *P2*, *P3* and *P4* to output variables

Table of Schematic C2: Optimization

	A	B	C	D
1	Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P3-wall (mm)	0,7	1,6	
4	P4-height (mm)	100	150	
5	P8-width_upper part (mm)	10	12	
6	P9-width_lower part (mm)	38	42	

Figure 24. New boundary values of the side rail input parameters

From the set of solutions, the following three solutions best met the set constraints: Candidate Point 1, Candidate Point 2 and Candidate Point 3 (Figure 25). Nevertheless, the solution of Candidate Point 2, because in addition to reducing the stress, it significantly reduces the mass. Finally, the values of parameters *P4*, *P8* and *P9* from Candidate Point 2 were rounded and the final solution was Optimization Solution 2 (Figure 25). This solution is the most adopted solution for optimizing the structural element of the side rail. The mass of the side rail compared to the initial model has been reduced by 4,55 % and is 4,5553 kg, and the amount of maximum equivalent stress has increased by 12,85 % and is 182,21 MPa

(Figure 25). The total deflection is reduced by 23,81 % and amounts to 9,8845 mm (Figure 25). The reduction of the maximum equivalent von Mises stress resulted in an increase in the load capacity. Also, the height parameter has a greater influence on the load capacity than the wall thickness (Figure 23). The wall thickness parameter, however, has a greater influence on the mass than the height parameter (Figure 23).

Table of Schematic C2: Optimization, Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Reference	Name	P3-wall (mm)	P4-height (mm)	P8-width_upper part (mm)	P9-width_lower part (mm)	P5-Total Deformation Maximum (mm)		P6-Equivalent Stress Maximum (MPa)		P7-Solid Mass (kg)	
2							Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3		Candidate Point 1	1	139,56	10,835	41,72	7,5337	-41,93 %	160,95	-23,01 %	5,0018	4,81 %
4		Candidate Point 2	1,1	120,81	11,057	40,28	9,6848	-25,35 %	179,82	-13,99 %	4,6006	-3,60 %
5		Candidate Point 3	1	147,38	10,539	38,52	6,8305	-47,35 %	156,57	-25,11 %	5,2565	10,15 %
6		Initial DP0	1,5	100	16,5	30	12,973	0,00 %	209,07	0,00 %	4,7723	0,00 %
7		Optimization Solution 2	1,1	120	11	40	9,8845	-23,81 %	182,21	-12,85 %	4,5553	-4,55 %
*		New Custom Candidate Point	0,7	125	11	40						

Figure 25. Optimal values of the side rail input parameters

5. Numerical calculation of the optimized model

The numerical calculation was performed on a ladder model whose structural elements, the crossbar and the side rail, were previously optimized. The optimized model was generated according to the adopted dimensions and input variables, i.e. dimensions 120×400×1,1×6000 mm. The obtained values of the maximum equivalent von Mises stress and total deflection are shown in Figure 26 and Figure 27. A comparison of the load capacity and mass between the initial and optimized ladder models is shown in Figure 28.

Figure 26. Maximum equivalent stress according to von Mises, MPa

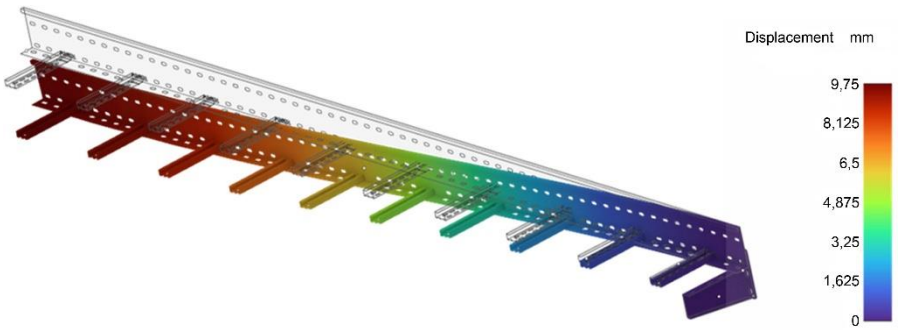


Figure 27. Maximum deflection, mm

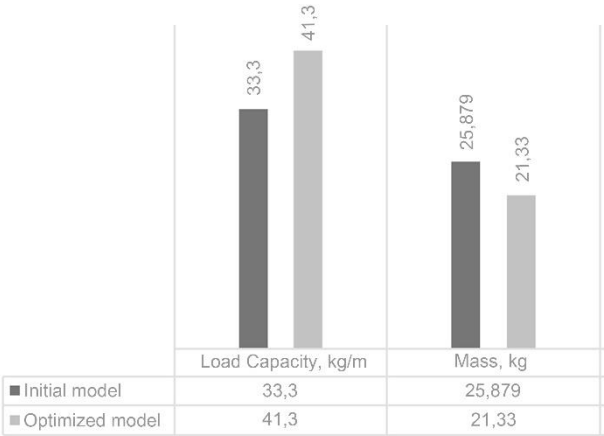


Figure 28. Comparison of the initial and optimized cable ladder model

Acknowledgements
This paper presents selected results of the master thesis completed and defended by Marko Cmuk under the supervision of professor Mirko Karakašić at the University North, in 2024.
This research paper was funded by the University of Slavonski Brod through the institutional research project *Analysis of the influence of design and process parameters of FDM technology on the mechanical and vibrational properties of polyamide PA6 tooth of a cylindrical spur gear for the purpose of optimizing the hybrid infill structure design*, financed by the European Union – NextGenerationEU.

6. Conclusion

The optimized ladder model provided some improvements compared to the initial model, indicating that the optimization of the crossbar and side rail elements met the set objective functions and given constraints. The maximum equivalent von Mises stress values for the optimized model are 191,4 MPa, which is a 3,39 % reduction compared to the initial model. Also, the total deflection of the optimized model is 9,75 mm, which is a 5,34 % reduction compared to the initial model.
The optimized model achieved an increase in load capacity. The load capacity increased from 33,3 kg/m to 41,3 kg/m, which represents an improvement of 24 %. Furthermore, the mass decreased from 25,879 kg to 21,33 kg, or by 17,36 %.
The optimized model has undergone a change in wall thickness from 1,5 mm to 1,1 mm. The height has also increased from 100 mm to 120 mm. The width and length of the ladder have remained the same. The increase in height contributes to an increase in the distance from the neutral axis, which increases the bending resistance and moment of inertia. It should be noted that the obtained results of optimizing the crossbar and side rail are exclusively optimal for this type of cable ladder.

7. References

[1] Home Products Wire mesh cable tray, URL:https://m.etwmy.com/index.php?ws=ourproducts&cat=WIRE-MESH-CABLE-TRAY&cid=357250 (Accessed: 10.5.2026.)

[2] Ralbo Cable Tray, URL:https://www.ralbo.in/dt_project/solid-bottom-cable-trays/ (Accessed: 10.5.2026.)
[3] Om Engineering Solution - Hot Dipped Galvanized Perforated Cable Tray, URL:https://www.omengineeringsolution.com/products/cables-containment-system/hot-dipped-galvanized-perforated-cable-tray/ (Accessed: 10.5.2026.)
[4] Gowin Galvanized Coating Cable Tray Ladders, URL:https://www.indiamart.com/proddetail/cable-tray-ladders-21318155597.html (Accessed: 10.5.2026.)
[5] Cmuk, Marko. Optimiranje konstrukcije kabelskih ljestava. / Diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2024.
[6] Standard Vođenje kabela - Sustavi kabelskih polica i kabelskih ljestava, https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+61537%3A2007 (Accessed: 18.5.2026.)
[7] Ansys Workbench, https://www.ansys.com/products/ansys-workbench (Accessed: 10.5.2026.)
[8] Xometry – Steel DC01, URL:https://xometry.pro/wp-content/uploads/2023/09/Steel-1.0330-DC01-6112.pdf (Accessed: 7.5.2026.)

Analysis of Cogeneration Plant Operation under Varying Outdoor Temperatures on the Coldest Day of the Year

A. Jakovčević[1*], I. Sutlović[1]

[1]University of Zagreb Faculty of Chemical Engineering and Technology, Zagreb, Croatia

[*]Corresponding author. E-mail: ajakovcevic@yahoo.com

Abstract

The response of a cogeneration plant to variations in outdoor temperature is analysed with a focus on the operation of a steam turbine with controlled steam extraction. The analysis is based on operational data from the combined heat and power plant TE-TO Zagreb for the coldest day of 2024. The available data show the delivered peak heating power of the cogeneration unit, boilers, and heat accumulators as a function of outdoor temperature. Based on the measured and read values of delivered thermal power from the cogeneration unit, the amount of extracted steam was determined. The relationship between extracted steam flow, produced electrical power, thermodynamic efficiency, and the thermal utilization factor was then analysed. For the observed operating regime, the total steam production was assumed to be constant at 180 $\frac{t}{h}$. The results show that the extracted steam flow does not follow a simple or strictly linear dependence on outdoor temperature, but rather fluctuates due to daily variations in heat demand, technical limitations of cogeneration units, and the additional operation of peak-load boilers and heat accumulators. An increase in extracted steam flow leads to a decrease in produced electrical power and thermodynamic efficiency, while the thermal utilization factor increases. The specified power-to-heat ratio of 0,45 indicates a heat-oriented cogeneration operating mode, with approximately 68,97 % thermal energy and 31,03 % electrical energy in the total useful energy output.

Key words: controlled steam extraction, outdoor temperature, extracted steam, thermal utilization factor, power-to-heat ratio.

1. Introduction

Cogeneration plants, which enable the simultaneous production of electricity and heat, represent one of the key solutions for achieving energy efficiency, sustainability and cost-effectiveness, while also reducing harmful environmental impacts [1,2]. Their operation is particularly important during periods of increased heat demand, especially in district heating systems that supply temperature-dependent consumers. Temperature-dependent consumers are those whose thermal energy consumption is directly influenced by outdoor temperature. During colder periods, and especially on the coldest days of the year, the demand for thermal energy increases significantly due to the intensive heating requirements

of residential and commercial buildings. As outdoor temperature decreases, heating systems become more heavily loaded and require greater amounts of thermal energy to maintain the required indoor conditions [3,4]. This research focuses on the operation of a cogeneration plant on the coldest day of the year, when the demand for thermal energy reaches one of its highest levels. The analysis investigates the relationship between outdoor temperature and the thermal energy demand of temperature-dependent consumers, with particular emphasis on the amount of extracted steam, delivered thermal power, generated electrical power, and efficiency indicators of the cogeneration process [4]. Since the observed day represents an extreme operating condition, the analysis provides insight into how a cogeneration plant responds to increased heat demand under low ambient temperature conditions. Outdoor temperature significantly affects the characteristics of cogeneration and steam systems, as confirmed by several studies, although most of them focus on standard plant configurations or broader operating periods. Singh and Kumar (2012) analyzed conventional power plants and concluded that an increase in outdoor temperature leads to a reduction in thermal efficiency. Similarly, Tiwari et al. (2013) reported that higher outdoor temperatures typically reduce the efficiency of combined systems. In more recent research, Sammour et al. (2023) examined the impact of outdoor temperature on combined cycle gas turbine plants, showing that higher outdoor temperatures lead to a reduction in overall system efficiency [5,6,7]. Compared to previous studies, which mostly focused on standard plant configurations and general operating conditions, this research is based on a cogeneration plant with a steam turbine with controlled steam extraction. The analysis is limited to the coldest day of the year and therefore represents a specific case study of plant operation under high heat demand. It examines how variations in outdoor temperature during that day are reflected in thermal energy consumption, the quantity of extracted steam, electrical power output, thermodynamic efficiency and the thermal utilization factor. In this way, the paper provides a more detailed understanding of the operating characteristics of cogeneration systems under conditions of increased thermal load [4].

2. Analysis of Cogeneration Plant Operation on the Coldest Day of the Year

2.1. Case Study Based on Real Operating Data from a Combined Heat and Power Plant

Based on the obtained data on the achieved peak heating power as a function of outdoor temperature on the coldest day of 2024, the aim of this analysis is to determine the relationship between outdoor temperature and the amount of extracted steam used for thermal energy production. The data refer to the Zagreb Combined Heat and Power Plant, which was designed for the simultaneous production of thermal and electrical energy. The data provided by Croatian Power Company (HEP) are shown in Figure 1 [8].

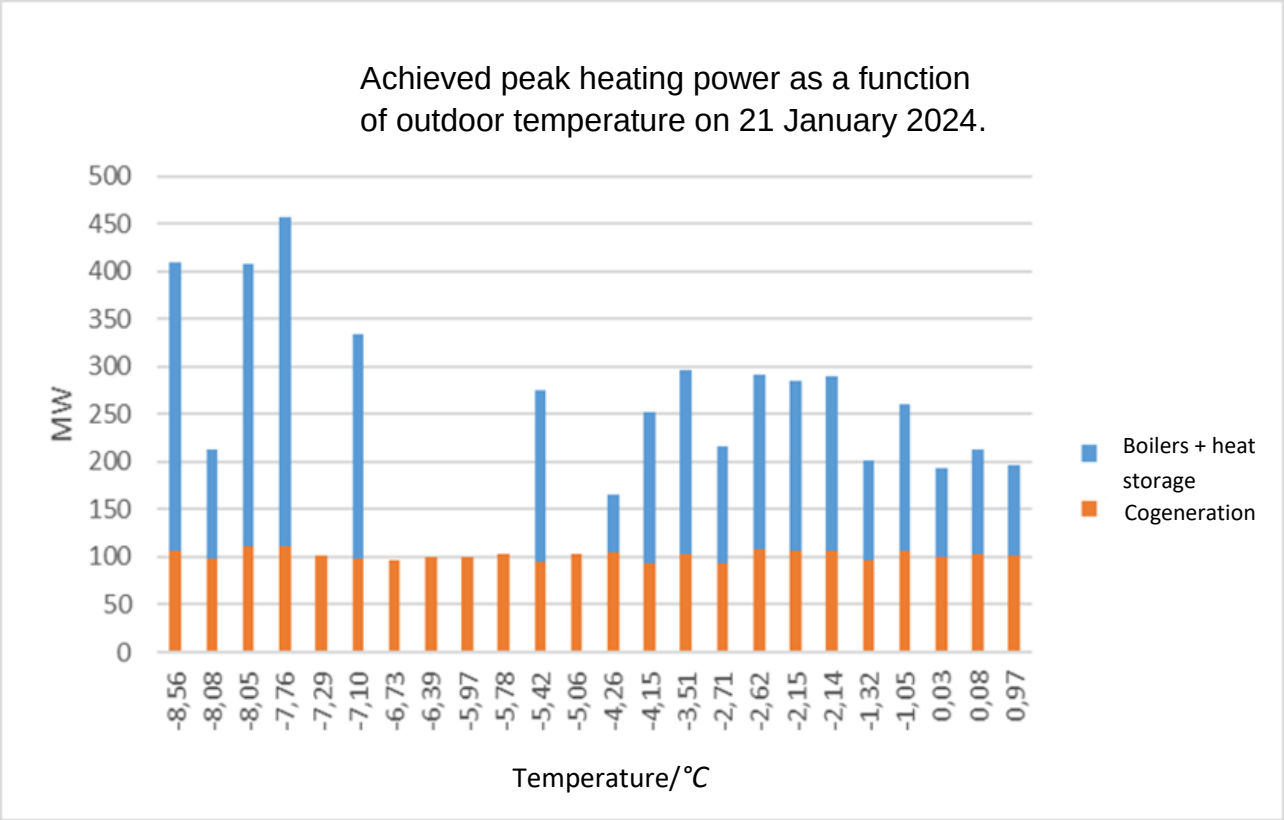


Figure 1. Achieved peak heating power as a function of outdoor temperature on 21 January 2024. [8]

Figure 1 shows the thermal power delivered by the cogeneration plant as a function of outdoor temperature on 21 January 2024, which was the coldest day of the year. The figure indicates that only a certain part of the total required thermal power was delivered by the cogeneration unit, while the remaining thermal demand was covered by additional heat sources, such as boilers and heat storage. Since the thermal power delivered by the cogeneration unit is known from the diagram, these values were read and used as the input data for the calculation. Since these values were obtained by graphical reading rather than from the original numerical dataset, they should be regarded as approximate, with a possible uncertainty related to the graphical resolution of Figure 1. The aim of this analysis is to determine how the amount of extracted steam in the cogeneration plant changes with outdoor temperature under the observed operating conditions. The constant live steam flow rate of D = 180 $\frac{t}{h}$ was adopted as a modelling assumption representative of the analysed operating regime, allowing the influence of variations in extracted steam flow on the calculated operating parameters to be evaluated under otherwise unchanged steam-production conditions [4]. The power-to-heat ratio of 0,45 was adopted based on literature data for condensing steam turbines with steam extraction [9]. For the thermodynamic calculation, the following specific enthalpy values were used: $h_1 = 3630\ [\frac{kJ}{kg}]$, $h_2 = 2940\ [\frac{kJ}{kg}]$, $h_3 = 2120\ [\frac{kJ}{kg}]$, $h_4 = 100\ [\frac{kJ}{kg}]$. For each value of thermal power delivered by the cogeneration unit, the corresponding amount of extracted steam, D_0, was calculated from

$$P_t = D_0\,(h_2 - h_4) \quad [\frac{kJ}{h}]. \tag{1}$$

After the extracted steam flow rate had been determined, the generated electrical power was calculated for each operating point

$$N_e = \frac{-D_0 \cdot (h_2 - h_3)}{3600} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{3600} = a1 \cdot D_0 + b1,\ a1 < 0 \quad [kW_e]. \tag{2}$$

The boiler heat balance was then calculated in order to determine the total heat input to the system

$$Q_K = D \cdot (h_1 - h_4) \ [\frac{kJ}{h}]. \tag{3}$$

Based on these values, the thermodynamic efficiency of the cogeneration process was determined

$$\eta_T = \frac{-D_0 \cdot (h_2 - h_3)}{Q_K} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{Q_K}. \tag{4}$$

Finally, the thermal utilization factor was calculated in order to evaluate the overall utilization of the available energy in the cogeneration plant

$$f = \eta_T + \frac{P_t}{Q_K} = \frac{D_0 \cdot (h_3 - h_4)}{Q_K} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{Q_K}. \tag{5}$$

The read values of thermal power delivered by the cogeneration unit, together with the calculated values of extracted steam flow rate, generated electrical power, thermodynamic efficiency and thermal utilization factor, are summarized in Table 1.

The calculations were performed using the Excel software tool to facilitate data collection and analysis. All other calculations in this research were also carried out in Excel to ensure accuracy and efficiency in data processing. Since the formulas will appear in standard units, the values in the tables are expressed in units that are easiest to present in tabular form, for example [$\frac{kJ}{h}$] in MW. The specified ratio between the total generated electrical and thermal energy is 0,45. Therefore, the share of electrical energy in the total useful energy output is 31,03 %, while the share of thermal energy is 68,97 %. This confirms that, under the observed operating conditions, the cogeneration plant primarily operated to meet the increased thermal demand, which is expected on the coldest day of the year [4].

Table 1: Calculated operating parameters of the cogeneration plant on the coldest day of 2024.

T/°C	P_t/MW_t	D_0/ $\frac{t}{h}$	N_e/MW_e	η_T	f
-8,56	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
-8,08	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-8,05	120,00	152,11	40,85	0,23	0,91
-7,76	120,00	152,11	40,85	0,23	0,91
-7,29	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-7,10	95,00	120,42	48,07	0,27	0,81
-6,73	90,00	114,08	49,51	0,28	0,79
-6,39	98,00	124,23	47,20	0,27	0,82
-5,97	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-5,78	105,00	133,10	45,18	0,26	0,85
-5,42	85,00	107,75	50,96	0,29	0,77
-5,06	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-4,26	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
-4,15	85,00	107,75	50,96	0,29	0,77
-3,51	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-2,71	85,00	107,75	50,96	0,29	0,77
-2,62	115,00	145,77	42,30	0,24	0,89
-2,15	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
-2,14	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
-1,32	90,00	114,08	49,51	0,28	0,79
-1,05	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
0,03	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
0,08	105,00	133,10	45,18	0,26	0,85
0,97	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83

2.2. Visualization of Cogeneration Plant Operating Parameters as a Function of Outdoor Temperature

By observing Figure 1 it can be seen that, in addition to the operation of the cogeneration units, boilers and heat storage systems are also operating simultaneously. This is due to the fact that cogeneration plants alone cannot meet the total thermal energy demand, especially during the coldest days of the year. Since the primary aim of this research is to present the dependence of cogeneration plant operation on outdoor temperature, it is necessary to show how the amount of extracted steam in the cogeneration units depends on ambient temperature. Figure 2 presents the dependence of extracted steam flow on outdoor temperature [4].

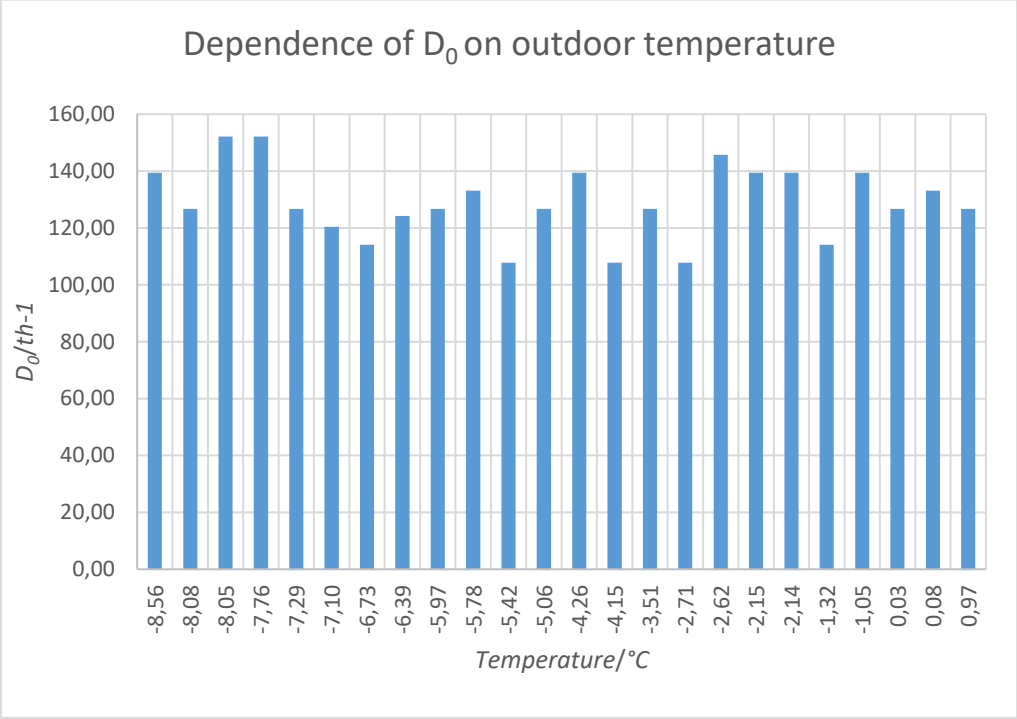


Figure 2. Dependence of extracted steam on outdoor temperature

The histogram shown in Figure 2 which presents the dependence of extracted steam on outdoor temperature, does not indicate a clear or regular relationship in which a decrease in temperature would always lead to an increase in the amount of extracted steam, or vice versa. Instead, it can be observed that the amount of extracted steam does not consistently decrease with increasing temperature, but rather oscillates. Several complex factors may contribute to this unclear relationship. First, it should be taken into account that the data were collected based on the observation of only one day in the year, without information about the specific time of day. It is important to note that heating usually starts at around 5 a.m. and lasts until approximately 9 or 10 p.m. Therefore, thermal energy consumption may be higher in the morning and evening hours, when heating demand is typically more intensive. These daily consumption cycles can significantly affect the amount of extracted steam. Second, cogeneration plants cannot simply increase the amount of extracted steam whenever the outdoor temperature decreases, because their operation is limited by the capacity and technical characteristics of the system. It should therefore be considered that steam turbines with controlled steam extraction are designed to cover the base load, meaning that they cannot rapidly change their operating regime. When outdoor temperatures decrease and heat demand increases, the system relies on peak-load boilers and heat storage systems to cover the additional thermal energy demand. This adjustment ensures stability and continuity in the supply of thermal energy to consumers. In addition, under the assumption of constant steam production, it is possible to identify other relationships related to the amount of extracted steam, such as thermodynamic efficiency, generated electrical power and the thermal utilization factor. These parameters provide

additional insight into the operating characteristics of the cogeneration plant. Figure 3 presents the dependence of electrical power on the amount of extracted steam.

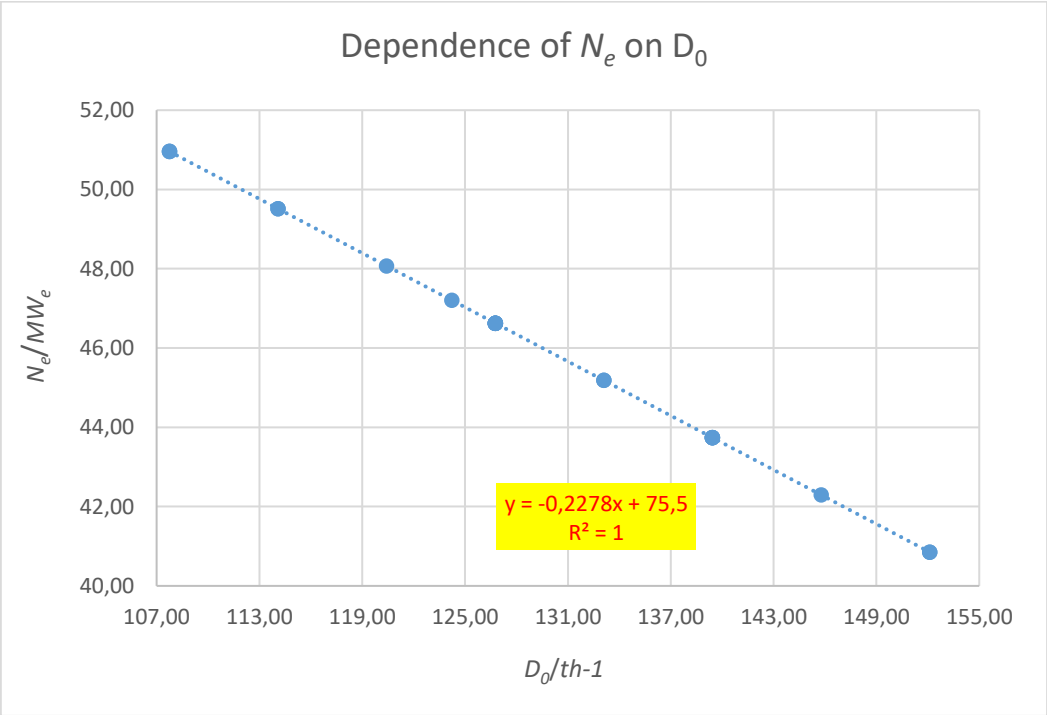


Figure 3. Dependence of electrical power on the amount of extracted steam

As the amount of extracted steam increases, the generated electrical power decreases for several reasons. The main reason is that a smaller amount of steam remains available to drive the low-pressure turbine and, consequently, the electrical generator. When less steam is available for turbine operation, the turbine produces lower mechanical power, which results in a reduced capacity for electricity generation. In other words, an increase in extracted steam reduces the amount of steam expanding through the turbine, thereby decreasing its ability to generate electrical power. This is an expected result, since the generated electrical power is directly related to the amount of steam passing through the turbine. Therefore, as the steam flow available for electricity generation decreases, the electrical power output of the turbine also decreases. Figure 4 illustrates how the thermodynamic efficiency changes in relation on the amount of extracted steam [4].

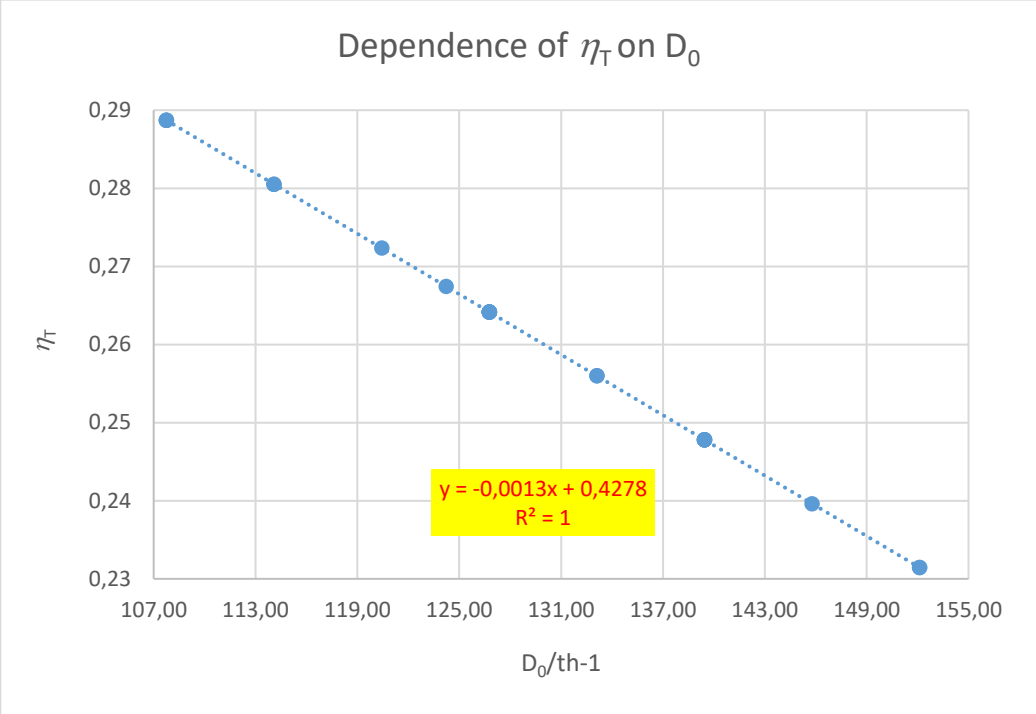


Figure 4. Dependence of thermodynamic efficiency on the amount of extracted steam

When steam production is constant, an increase in the amount of extracted steam results in a decrease in the thermodynamic efficiency of the cogeneration plant. As the amount of extracted steam increases, the amount of steam expanding through the low-pressure turbine decreases. A lower steam flow through the low-pressure turbine reduces the mechanical power that can be generated, which consequently leads to a decrease in electrical power output. Furthermore, increased heat losses within the system and a reduction in steam pressure have a negative effect on the conversion of thermal energy into electrical energy. Lower steam pressure limits the turbine's ability to generate the required mechanical power, which further reduces electricity production. Figure 5 shows the dependence of the thermal utilization factor on the amount of extracted steam [4].

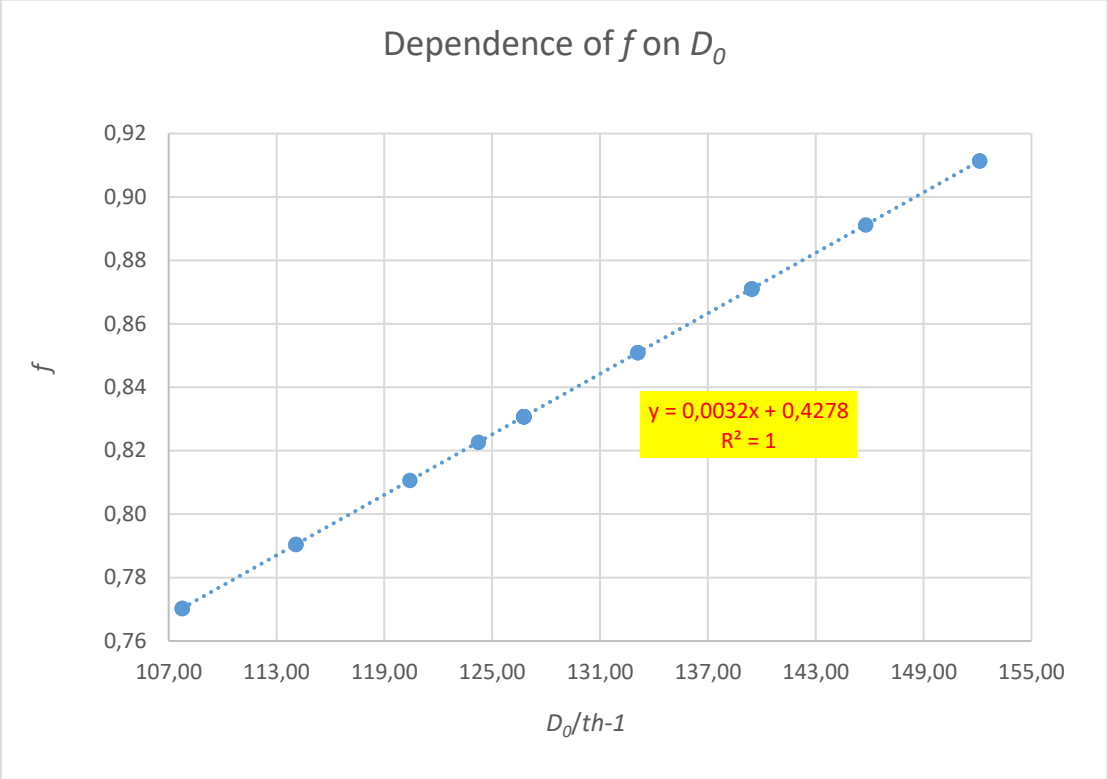


Figure 5. Dependence of the thermal utilization factor on the amount of extracted steam

The thermal utilization factor increases with the amount of extracted steam, because a larger amount of steam is used for thermal energy production. A higher value of the thermal utilization factor indicates that a greater share of the available energy is utilized for meeting the thermal demand of temperature-dependent consumers. In order to interpret the operating mode of the cogeneration plant, the specified ratio between the total generated electrical and thermal energy was also considered. In this analysis, the power-to-heat ratio was set to 0,45, which corresponds to a heat-oriented operating regime. This means that the useful energy output consists of approximately 68,97 % thermal energy and 31,03 % electrical energy. Such a distribution indicates that the plant operation was primarily directed toward satisfying the increased demand for thermal energy, which is expected on the coldest day of the year and is consistent with the basic principle of cogeneration [4].

3. Conclusion

In this paper, the operation of a cogeneration plant with controlled steam extraction was analysed under the conditions recorded on 21 January 2024, the coldest day of the year. The analysis was based on the delivered thermal power of the cogeneration unit as a function of outdoor temperature, with a constant live steam flow rate of D = 180 $\frac{t}{h}$. The observed outdoor temperatures ranged from −8,56 °C to 0,97 °C, while the thermal power delivered by the cogeneration unit ranged from 85 MW_t to 120 MW_t. Based on the read values of delivered thermal power, the corresponding amount of extracted steam was

calculated. The extracted steam flow ranged from 107,75 $\frac{t}{h}$ to 152,11 $\frac{t}{h}$. The lowest extracted steam flow was obtained at a delivered thermal power of 85 MW_t, while the highest extracted steam flow was obtained at 120 MW_t. However, the results showed that the amount of extracted steam did not follow a simple linear dependence on outdoor temperature. Instead, the values fluctuated, which can be explained by daily variations in heat demand, the limited flexibility of cogeneration units, and the simultaneous operation of additional heat sources such as boilers and heat storage systems. The analysis also showed that increasing the amount of extracted steam reduces the generated electrical power. When the extracted steam flow increased to 152,11 $\frac{t}{h}$, the electrical power decreased to 40,85 MW_e. Conversely, when the extracted steam flow was 107,75 $\frac{t}{h}$, the electrical power reached 50,96 MW_e. This confirms that a larger share of steam used for heat production leaves less steam available for expansion through the turbine and therefore reduces electricity generation. A similar trend was observed for the thermodynamic efficiency. The thermodynamic efficiency ranged from 0,23 to 0,29 and decreased with increasing extracted steam flow. The lowest value of 0,23 was obtained at the highest extracted steam flow of 152,11 $\frac{t}{h}$, while the highest value of 0,29 was obtained at the lowest extracted steam flow of 107,75 $\frac{t}{h}$. In contrast, the thermal utilization factor increased with the amount of extracted steam, ranging from 0,77 to 0,91. The maximum value of 0,91 was obtained when the delivered thermal power was 120 MW_t, indicating that a greater share of the available energy was used for thermal energy production. The specified power-to-heat ratio of 0,45 corresponds to a heat-oriented cogeneration operating regime. This means that the useful energy output consisted of approximately 68,97 % thermal energy and 31,03 % electrical energy. Such a distribution confirms that, under the observed conditions, the cogeneration plant primarily operated to satisfy increased thermal demand, which is expected on the coldest day of the year. Overall, the results show that cogeneration operation under low outdoor temperature conditions is strongly influenced not only by ambient temperature, but also by heat demand dynamics, technical limitations of the plant and the role of additional heat sources in maintaining a stable heat supply.

4. Literature

[1] Isa, Normazlina Mat; Tan, Chee Wei; Yatim, Abdul Halim Mohd. Comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: a perspective from architecture and operating system // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2017), 2236–2263.

[2] https://www.epa.gov/chp/what-chp (access on 25.06.2025.)

[3] Budin, Rajka; Mihelić-Bogdanić, Alka. Osnove tehničke termodinamike. Zagreb, 2002.

[4] Jakovčević, Andrija. Odziv kogeneracijskog postrojenja na promjenu vanjske temperature. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2024. Master thesis.

[5] Singh, Sarabpreet; Kumar, Rajesh. Ambient air temperature effect on power plant performance // *International Journal of Engineering Science and Technology* (IJEST), 4(2012), 3916–3923.
[6] Tiwari, Arvind; Hasan, Mohd Muzaffarul; Islam, Mohd. Effect of ambient temperature on the performance of a combined cycle power plant // *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 37(2013), 1177–1188.
[7] Sammour, Alaa Ahmad; Komarov, Oleg V.; Qasim, Mohammed A.; Almalghouj, Samair; Al Dakkak, Ali Mazen; Du, Yang. Ambient conditions impact on combined cycle gas turbine power plant performance // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(2023), 557–574.
[8] HEP d.d. Zagreb, 2024. Personal communication.
[9] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2023_03_28_471.html (access on 25.06.2025.)
[10] https://meteo.hr/ (access on 25.06.2025.)

Engineering Assessment of the Transition to Full BEV Passenger Car Mobility and the Potential Role of LPG

M. Barukčić[*,1], H. Glavaš[1]

[1]Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, J.J. Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia

[*]Corresponding Author. E-mail: marinko.barukcic@ferit.hr

Abstract

In this review are investigated main engineering chalanges of transition to full battery-electric vehicles mobility in segment of passenger cars and possible contribution of liquefied-petroleum-gas fueled passenger cars. Battery-electric vehicles generally have higher manufacturing emissions because of traction-battery production but lower use-phase and total greenhouse-gas emissions on most electricity grids. Liquefied-petroleum-gas vehicles offer rapid refuelling, established infrastructure in some markets, and modest tailpipe CO_2 and pollutant reductions relative to gasoline; however, fossil liquefied-petroleum-gas remains carbon-emitting. Renewable liquefied-petroleum-gas can reduce fossil-carbon demand and use existing assets, but its benefits and scalable supply depend on feedstock, process energy, allocation, and competing uses. Large-scale battery-electric vehicles deployment requires coordinated investment in electricity generation, networks, charging infrastructure, and load management. Overall, the evidence supports battery-electric vehicles as the more robust long-term passenger-car decarbonization pathway, while Liquefied-petroleum-gas particularly renewable liquefied-petroleum-gas may provide a transitional or niche option where electrification is constrained or existing vehicles and refuelling assets can be retained. Policymakers should not overlook engineering issues when developing public policy for full e-mobility in the passenger car segment.

Key words: battery-electric vehicles; liquefied petroleum gas; life-cycle emission; charging infrastructure; transport decarbonization

1. Introduction

Battery Electrical (or shorten just Electrical) Vehicles (BEVs, EVs) are central to policies for reducing greenhouse-gas (GHG) emissions from passenger transport. In the European Union (EU), Regulation (EU) 2023/851 requires a 100% reduction in the fleet-wide average CO_2 emissions of new passenger cars and light commercial vehicles from 2035 relative to the 2021 baseline [1]. Deployment may nevertheless be constrained by battery performance and infrastructure. Charging time depends on cell charge acceptance and on access to sufficiently powerful grid connections. QuantumScape reported cell-level energy densities of 301 Wh/kg and 844 Wh/L for its QSE-5 B-sample solid-state cell [2]. Stellantis and

Factorial Energy reported charging validated 77-Ah solid-state cells from 15% to more than 90% in 18 minutes at room temperature [3]. Such developments could reduce vehicle charging time, but simultaneous high-power charging can create short-duration distribution-grid peaks. Accommodating these loads may require reinforcement of substations, transformers, feeders, and charging sites, supplemented by managed charging and stationary storage. In December 2025, the European Commission proposed reducing the 2035 fleet-wide target from 100% to 90%, with the residual emissions offset through credits for qualifying renewable fuels and EU-produced low-carbon steel [4]. The proposal has not replaced the existing target. A Council progress report dated 15 June 2026 recorded divergent member-state positions and an expected European Parliament plenary vote in November 2026 [5]. The proposal could retain a limited post-2035 role for combustion and hybrid vehicles, but would not classify every nominally carbon-neutral fuel as zero-emission. Fuel eligibility, accounting rules, credit scale, and environmental integrity remain under debate. This context increases the relevance of qualifying renewable fuels, potentially including bio-LPG, as transitional or complementary options; fossil LPG remains carbon-emitting. This review therefore compares BEV and LPG passenger-car pathways from an engineering and life-cycle perspective.

2. Main points should consider towards transition to full passanger car e-mobility

The comparison should cover at least:

- environmental performance;
- operational characteristics;
- refuelling or charging infrastructure and
- costs.

A BEV powertrain comprises a traction battery, power electronics, and one or more electric motors. An LPG vehicle uses a spark-ignition internal-combustion engine, pressure-rated fuel tank, fueldelivery hardware that may include a vaporizer, and exhaust after-treatment. Both platforms require braking, steering, lighting, and thermal-management systems, although implementation differs. For example, BEVs require resistance heating or a heat pump because engine waste heat is unavailable. Production each of these parts contribute to the total GHG emission.

2.1. Environmental performance

The environmental assessment includes vehicle and energy production, operation, maintenance, and end of life. Direct LPG–BEV comparisons include Belgian, Spanish, Italian, and grid-sensitive studies [6–9]. These studies generally assign BEVs a higher production footprint, primarily because of traction-battery production, and LPG vehicles a higher use-phase footprint. The final ranking depends on the electricity mix, vehicle class, fuel composition, lifetime distance, and system boundary. LPG is commonly co-produced during natural-gas processing and crude-oil refining. Its upstream footprint depends on feedstock origin, extraction losses, process energy, refinery allocation, transport, energy use

at terminals and filling stations, and fugitive propane or butane emissions. The allocation method is influential because LPG is a co-product. Attributional Life Cycle Assasement (LCA) assigns LPG a share of emissions from the existing production system, whereas consequential LCA estimates the market and production changes induced by additional demand. Measurements indicate modest tank-to-wheel CO_2 reductions relative to gasoline. In Figure 1 the example of comparison for different countries of GHG emissions is shown.

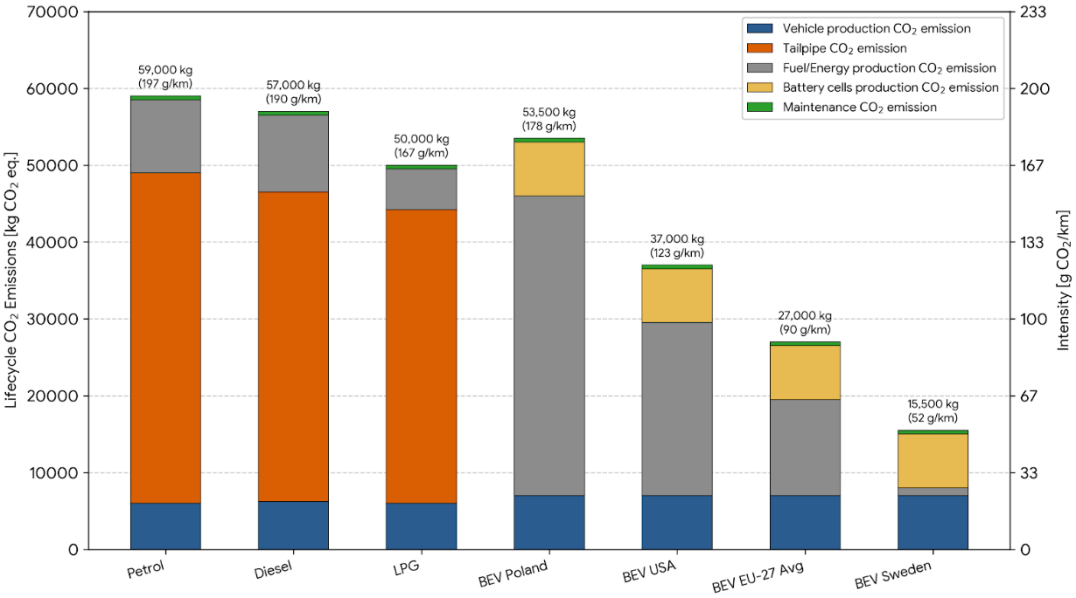


Figure 1. LCA GHG emission comparisioon (based on data presented in [9])

The total life-cycle GH) emissions (E_{total}) of the vehicle are quantified as the linear sum of five distinct lifecycle phase contributions, as expressed in [9]:

$$E_t = E_{vp} + E_{bp} + E_t + E_{ep} + E_m \quad (1)$$

where: E_{vp} represents the vehicle manufacturing emissions (excluding battery cell production), E_{bp} represents the emissions embedded in battery cell manufacturing, E_{tp} represents the operational tailpipe (direct) emissions, E_{ep} represents the fuel and energy production (well-to-tank/indirect) emissions for both internal combustion and electric powertrains and E_m represents the emissions associated with maintenance over the vehicle's operational service life.

Tests of Euro 6 gas vehicles found 10–23% lower CO_2 emissions in gas mode than in gasoline mode, although the results depended strongly on vehicle technology and test conditions [10]. Laboratory and on-road tests of five Euro 6 LPG bi-fuel cars likewise found consistent CO_2 reductions after switching from gasoline to LPG [11]. These results neither make LPG carbon-neutral nor establish its cradle-to-grave performance. Global modelling indicates lower life-cycle emissions from BEVs in most electricity regions, with the advantage increasing as power systems decarbonize [12]. A GREET-based U.S. analysis reaches the same general conclusion but identifies substantial sensitivity to vehicle technology, grid mix, and lifetime assumptions [13]. The most directly relevant recent LCA

examined B- and C-segment cars using a blend of 60% fossil LPG, 20% bio-LPG, and 20% renewable dimethyl ether, with gasoline and BEV comparators [8]. Depending on the vehicle segment, the blend reduced climate impact by 16–21% relative to gasoline, whereas the BEV reduction was 36–38%. Neither option performed best in every impact category, and impacts increased with vehicle size. Because the blend was not fossil LPG, it should not be treated as a fossil-autogas emission factor; nevertheless, its renewable fraction did not close the modelled climate-impact gap with the BEV. Other analyses emphasize the importance of energy-production emissions. Assuming a vehicle lifetime of 300,000 km, in [9] is found that the total GHG footprints of BEVs and LPG-fuelled cars could be similar and that, under some electricity-generation scenarios, the BEV footprint could be higher. The result was strongly influenced by the GHG intensity of fuel and electricity production, which varies among countries. In the LPG pathway, fuel-production emissions represented a relatively small share of the total, whereas tailpipe emissions from LPG combustion were dominant. Consequently, BEVs cannot be assumed in to have lower life-cycle GHG emissions in general. In the Italian study, total emissions were 151 and 164 g CO_2-eq/km for the B and C-segment BEVs, compared with 187 g and 223 g CO_2-eq/km for the corresponding partially renewable LPG-blend vehicles [8]. The Spanish study reported 86.5 g CO_2-eq/km for the BEV and 219.5 g CO_2-eq/km for fossil LPG [7]. These values illustrate the sensitivity of results to location and input assumptions. Overall, BEVs generally have the lower life-cycle GHG footprint, but the magnitude and, in some scenarios, the direction of the difference depend on the underlying assumptions. Environmental performance also includes pollutants other than GHGs. The assessment therefore covers PM2.5, PM10, NOx, hydrocarbons (HC), NH3, CO, and non-exhaust particles from tyre, brake, and road wear. Evidence includes idle measurements from gasoline, diesel, and LPG vehicles [14]; laboratory and on-road tests of Euro 6d bi-fuel cars operated on gasoline and an LPG/DME blend [15]; and a COPERT-based comparison of combustion vehicles with equivalent Polish power-sector emissions from BEVs [16]. Like shown in [11] LPG combustion can produce higher amount of some pollutants comparing to gasoline. However, in [16] are presented interesting results showing that final emissions of pollutants for LCA can be higher for BEV then LPG in case of high carbonised electricity generation like it is in Poland. Neither powertrain eliminates tyre wear, road wear, or resuspended dust. Higher BEV mass can increase tyre loading, while regenerative braking reduces friction-brake use. LPG vehicles retain both friction braking and an exhaust source. In [17] can be found very interesting data for non-exhaust PM emissions from electric vehicles pointing that BEV PM emissions are comparable to those of conventional vehicles mainly due to its weigth; BEVs is 24% heavier than comparable conventional fueled cars. Lightweight design, durable tyres and brakes, speed management, and reduced vehicle-kilometres benefit both technologies. Comparing pollutant emission in [18] for two class of bled LPG and petrol driven cars shows mixed results over different pollutants emissions; for some pollutants blend LPG has higher values then petrol and for some lower.

2.2. Operational characteristics

Operational performance depends on energy consumption, drivetrain efficiency, range, acceleration, maximum speed, and charging or refuelling time. User suitability also depends on trip length, duty cycle, access to home or workplace charging, vehicle class, and required route flexibility. A review of drivetrain review supports the BEV efficiency and charging values [19] reporting BEV consumption in range 15–20 kWh per 100 km; instrumented tests provide averages for 47 EVs and more than 2200 gasoline, diesel, and hybrid vehicles [20]. The main reason for such big difference is efficiency of the drive engine of 20-40% and 80-90% for internal combustion engine and EV, respectively [20]. Based on this extensiv real life testing in USA market final results are average of 8.11 l/100 km for conventional cars and equivalent of 2.56 l/100 km for EV. In [21] interesting results for BEV of city class (61 kW rated power) are presented, showing high dependence of average BEV consumption depending of acceleration for the same distance of 300 m. The measured consupmtion is in range 19.4-114.5 kWh/100 km, showing about 5.9 times higher consumption for highest compared to lowest acceleration. Similar research for gasoline car (110 kW rated power) show range of consumption of 6.93-22.92 l/100 km resulting with highest to lowest ratio of around 3.3 for same tested distance of 400 m [22]. This implicates that driving style to energy consumption has bigger impact for BEV then gasoline cars. Comparing fuel consumption for LPG to gasoline RON 95, autors in [23] show similar volume consumption slightly higher for LPG at higher car speed. Despite this, energy consumption was higher for gasoline then LPG for all tested car speeds. Acceleration tests show diference of about 1 s faster gasoline then LPG. The vehcile weigths play one of the important role regarding car performances. The weigths of BEV is for 20-30% higger then comparable gasoline vechile depending on size as shown in Table 1.

Table 1. Weigth comparison of BEV and gasoline cars (unladen vehicle + 75 kg driver/luggage + necessary fluids/90% fuel tank)

Car segment	BEV-Gasoline version	Weigths (EV-Gasoline) in [kg]	EV/Gasoline weigths percentage in [%]
B (subcompact)	Peugeot 208 1.2 PureTech- e-208	1530-1165	131
C (compact)	Peugeot 308 1.2 PureTech- e-308	1684-1363	124
D (mid-size)	BMW 420i Gran Coupé-i4 eDrive40	2125-1695	125

2.3. Charging and refuelling infrastructure

LPG refuelling networks are established in some countries and commonly share conventional fillingstation sites. Existing sites can reduce deployment cost, but LPG requires dedicated pressure vessels, pumps, dispensers, controls, and safety systems. Gasoline storage equipment cannot be repurposed without engineering assessment and modification. BEVs transfer energy demand to the electricity system. Large-scale deployment increases

annual consumption and can create short-duration peaks from fast charging, requiring generation, transmission, and distribution investment. Under its highest EV-penetration scenario, a Costa Rican power-system simulation predicted deteriorating voltage profiles after 2030 and major infrastructure deficiencies by 2040 [24]. At a charging site, five simultaneous 250-kW sessions impose 1.25 MW. This is over or comparable to the rating of many distribution medium to low voltage transformers often rated in range 250-1600 kVA. Large sites may therefore require medium-voltage connections, dedicated transformers, feeder reinforcement, and load management. Planning must address coincident peak power rather than average energy demand alone. In [25] can be found report regarding deter electric vehicle adoption due to Power supply disruptions in China cities as example of strong rate electrification in passanger transportation. Example for Croatia illustrates the possible scale. At the end of 2025, it had 2,058,313 registered passenger cars [26]. A separate survey gives 7.6 km of passenger travel per person per day like it is presented in Eurostat data [27, 28]. Using this value only as a simplified proxy for daily distance per car, a BEV with 45 kWh usable capacity and 150 Wh/km consumption has approximately 300 km of range and would charge every 39 days. Uniform scheduling would imply approximately 52,000 charging vehicles per day. In an illustrative high-concurrency case, 5500 simultaneous 250 kW sessions would impose 1.375 GW, or approximately 43% of the reported 3.225-GW Croatian peak load [29]. At 350 and 400 kW charging powers, the peak power loads would be 1.925 and 2.200 GW, respectively (Figure 2).

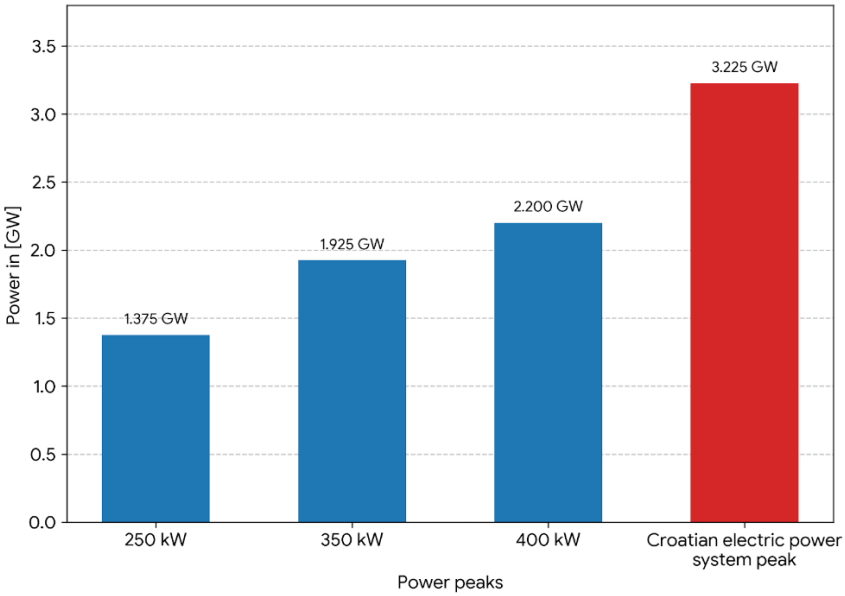


Figure 2. Peak powers for different fast charging powers on base of charging 5500 BEV at same time

These calculations illustrate possible impact of full transiton on BEV mobility and usage of very fast chargers.

2.4. Costs

User cost comprises vehicle acquisition, financing, energy, maintenance, insurance, taxation, residual value, and end-of-life cost. Comparisons must use equivalent vehicle classes, equipment levels, annual distances, energy prices, discount rates, and ownership periods. Manufacturing cost and externalities also reflect material demand. BEVs increase demand for lithium, graphite, nickel, cobalt, manganese, iron, phosphate, copper, and aluminium, depending on cell chemistry and pack design. Mining and refining affect water, land, waste, labour, and local communities. Recycling can reduce primary-material and energy demand, but rapid fleet growth prevents it from eliminating near-term extraction. High collection rates, design for disassembly, and battery-grade material recovery are therefore important [30]. LPG vehicles require fewer battery minerals but consume fuel throughout their service life. Their supply chain includes wells, pipelines, refineries or gas-processing plants, terminals, road transport, and filling stations. The engineering comparison is thus between a larger recoverable material stock at manufacture and continuous fuel throughput during operation, in addition to infrastructure and materials common to both systems. Purchase-price ratios vary substantially with segment, equipment, market, and incentives; unmatched retail models do not provide a defensible technology-wide ratio. Factory LPG vehicles are uncommon in some premium segments, where comparison may require adding conversion cost to a gasoline vehicle. Total cost of ownership (TCO) can nevertheless differ from purchase price because BEVs generally have lower energy and maintenance costs. A German assessment of 55 commercially available variants found that BEVs had the lowest TCO and external cost in every evaluated segment over 16 years, including purchase price, subsidies, enviroemental costs, residual value, energy, maintenance, insurance, and taxes [31]. The main conclusion of the study is that BEV have lower total cost ownership as well as external costs comparing to the conventional fueled cars. LPG was not included but can be estimated around of 5-10 % higher of gasoline consumption based on data given in [24] considering that price of LPG is around 50% of gasoline price [32].

3. Renewable LPG and blended-fuel options

Bio-LPG releases CO_2 at the tailpipe also. A recent passenger-car LCA identified waste-derived inputs as promising but emphasized limited feedstock availability and the need for higher renewable content [8]. Renewable LPG is compatible with existing LPG vehicles and stations. Its principal limitation is scale: it is often a minor co-product and competes with heating, industry, petrochemicals, and transport. System-level allocation should therefore prioritize applications in which a limited supply avoids the greatest emissions rather than assume sufficient volume to decarbonize the passenger-car fleet. BEVs emit no tailpipe NOx, CO, hydrocarbons, NH_3, or exhaust particles. Emissions also depend on engine architecture, injection system, catalyst temperature and ageing, calibration, conversion quality, and road load. Older conversions cannot be assumed to match new factory Euro 6 systems. Bi-fuel control strategy is also important. Some vehicles start on gasoline and switch to LPG only after warm-up, concentrating gasoline use when catalyst conversion is weakest. Its potential climate benefit arises because the carbon may be biogenic rather than fossil; it does not follow from zero physical emissions. Production energy, feedstock

recovery, land-use effects, transport, and co-product allocation must therefore be included in the life-cycle balance. Net life-cycle emissions depend on allocation between the primary liquid product and propane co-product, hydrogen source, process energy, feedstock counterfactual, land-use change, transport, and supply-chain methane and nitrous-oxide emissions. For Hydrotreated Vegetable (HVO) biopropane, in [33] is reported a wide footprint range across feedstocks and allocation methods of 5 g CO_2e/MJ to to 102 g, demonstrating that the label “renewable” is insufficient. Brazilian HVO-route modelling likewise found strong dependence on feedstock and process design [34]. This study shows that Global Warming Potential for bioLPG produced from HVO is in range (depending on used scenarios) 1.51-6.59 kg CO_{2eq} comparing to 0.62 kg CO_{2eq} for fossil LPG. This shows that policy creators should considering detailed research for specific area/country to estimate GHG footprint of bioLPG.

4. Conclusion

BEVs generally have higher manufacturing emissions but lower operational GHG emissions on most electricity grids and no tailpipe emissions. Under their respective assumptions, the direct LCAs reviewed here assign BEVs a lower climate impact than either fossil LPG or a partially renewable LPG/DME blend. This advantage increases with low-carbon electricity and battery production, efficient and appropriately sized vehicles, long service lives, and effective recycling. However, as electricity generation becomes less carbon-intensive, the life-cycle environmental advantage of BEVs over diesel-, gasoline-, and LPG-fuelled passenger cars generally increases. The evidence consequently supports fossil LPG primarily as a transitional or niche option and BEVs as the more robust long-term passenger-car decarbonization pathway. Renewable LPG is questaiable to decreas GHG footprint relative to the fossile LPG. Achieving this outcome requires more than powertrain substitution: it also requires low-carbon material and vehicle production, adequate electricity generation and networks, managed charging, responsible battery supply chains, and targeted use of limited renewable fuels. Policymakers must account for complex socio-technical interdependencies when modeling the shift to full passenger car e-mobility. Given these dynamic variables, no universal policy solution exists.

5. References

[1] European Parliament and Council of the European Union; Regulation (EU) 2023/851. Official Journal of the European Union, L 110, 5–20, 2023. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/851/oj.

[2] QuantumScape; A first look at the QSE-5 B sample. Company blog, 23 October 2024. https: //www.quantumscape.com/blog/a-first-look-at-the-qse-5-b-sample/ (accessed 21 July 2026).

[3] Stellantis and Factorial Energy reach key milestone in solid-state battery development; Press release, 24 April 2025. https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2025/april/ stellantis-and-factorial-energy-reach-key-milestone-in-solid-state-battery-development (accessed 21 July 2026).

[4] European Commission; Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2019/631. COM(2025) 995 final, 16 December 2025, 2025/0420(COD). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52025PC0995.

[5] Council of the European Union; Proposal for a regulation amending Regulation (EU) 2019/631: progress report. Council document 10065/1/26 REV 1, 15 June 2026. https://data.consilium. europa.eu/doc/document/ST-10065-2026-REV-1/en/pdf.

[6] Boureima, F.-S. et al.; Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context. World Electric Vehicle Journal, 3, 469–476, 2009. doi:10.3390/wevj3030469.

[7] Perez, J., Lumbreras, J., L´opez, J. M., Garcia, J. A., Vedrenne, M., de Andr´es, J. M., and Paz, D.; Comparison of greenhouse gas emissions from different vehicles covering the entire life cycle. WIT Transactions on the Built Environment, 128, 85–95, 2012. doi:10.2495/UT120081.

[8] Puricelli, S., Eid, M., Casadei, S., Dolci, G., Lixi, S., van den Oever, A., Rigamonti, L., and Grosso, M.; Life cycle assessment of a partially renewable blend for bi-fuel passenger cars and comparison with petrol and battery electric cars. Journal of Cleaner Production, 505, 145347, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145347.

[9] Borkowski, A. and Zawi´slak, M.; Comparative analysis of the life-cycle emissions of carbon dioxide emitted by battery electric vehicles using various energy mixes and vehicles with ICE. Combustion Engines, 192(1), 3–10, 2023. doi:10.19206/CE-147159

[10] Giechaskiel, B. et al.; Emissions of Euro 6 mono- and bi-fuel gas vehicles. Catalysts, 12, 651, 2022. doi:10.3390/catal12060651.

[11] Bellin, T., Casadei, S., Rossi, T., Bernetti, A., De Lauretis, R., and Lonati, G.; Determination of Euro 6 LPG passenger car emission factors through laboratory and on-road tests: Effect on nation-wide emissions assessment for Italy. Atmospheric Environment: X, 15, 100186, 2022. doi:10.1016/j.aeaoa.2022.100186.

[12] Knobloch, F. et al.; Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. Nature Sustainability, 3, 437–447, 2020. doi:10.1038/s41893-020-0488-7.

[13] Kelly, J. C. et al.; Cradle-to-grave lifecycle analysis of U.S. light-duty vehicle-fuel pathways: A greenhouse gas emissions and economic assessment of current (2020) and future (2030–2035) technologies. Argonne National Laboratory, ANL-22/27 Rev. 1.2023.

[14] Aosaf, M. R., Wang, Y., and Du, K.; Comparison of the emission factors of air pollutants from gasoline, CNG, LPG and diesel fueled vehicles at idle speed. Environmental Pollution, 305, 119296, 2022. doi:10.1016/j.envpol.2022.119296.

[15] Rossi, T., Lixi, S., Puricelli, S., Grosso, M., Faedo, D., and Casadei, S.; Fuel consumption and exhaust emissions from Euro 6d vehicles fueled by innovative LPG/DME blend. Journal of the Energy Institute, 117, 101851, 2024. doi:10.1016/j.joei.2024.101851.

[16] Zimakowska-Laskowska, M. and Laskowski, P.; Comparison of pollutant emissions from various types of vehicles. Combustion Engines, 197(2), 139–145, 2024. doi:10.19206/CE-181193.

[17] Timmers, V. R. J. H. and Achten, P. A. J.; Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. Atmospheric Environment, 134, 10–17, 2016. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.03.017.

[18] Eid, M., Puricelli, S., Casadei, S., Lixi, S., Rigamonti, L., and Grosso; Well-to-wheel analysis of passenger cars fuelled with a blend of LPG, bio-LPG, and renewable DME. Clean Technologies and Environmental Policy, 27, 8431–8441, 2025. doi:10.1007/s10098-025-03307-5.

[19] Wahid, M. R., Budiman, B. A., Joelianto, E., and Aziz, M.; A review on drive train technologies for passenger electric vehicles. Energies, 14, 6742, 2021. doi:10.3390/en14206742.

[20] VanderWerp, D.; How EVs compare to gas-powered vehicles in seven performance metrics. Car and Driver, 15 May 2021. https://www.caranddriver.com/features/g36420161/ evs-compared-gas-powered-vehicles-performance/ (accessed 21 July 2026).

[21] Graba M, Hennek K, Mamala J, Prażnowski K, Mueller M. Acceleration dynamics of a passenger vehicle with an electric powertrain and their impact on the mileage energy consumption. Combustion Engines. 2025;203(4):3–8. doi:10.19206/CE-206090.

[22] Mamala J, Graba M, Bieniek A, et al. Evaluation of energy consumption in the acceleration process of a passenger car. Combustion Engines. 2022;190(3):35–44. doi:10.19206/CE-142553.

[23] Suyabodha, A.; Comparison the rate of energy consumption between Gasoline95 and LPG in spark ignition engine under real driving conditions. Energy Procedia, 118, 164–171, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.035.

[24] G´omez-Ram´ırez, G. A., Solis-Ortega, R., and Ross-L´epiz, L. A.; Impact of electric vechicles on power transmission grids. Heliyon, 9(11), 2023. e22253. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e22253.

[25] Qiu, Y., Deng, N., Wang, B. *et al.*; Power supply disruptions deter electric vehicle adoption in cities in China. *Nat Commun* **15**, 6041, 2024. https://doi.org/10.1038/s41467-024-50447-1.

[26] Croatian Bureau of Statistics; Registered road vehicles and road traffic accidents, 2025. First Release TRAN-2026-1-2, 15 April 2026. https://podaci.dzs.hr/2026/hr/121389 (accessed 22 July 2026).

[27] Eurostat; Passenger cars—per thousand inhabitants. Online data code road updated https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/road_eqs_carhab (accessed 22 July 2026).

[28] Eurostat; Passenger mobility statistics. Statistics Explained, data extracted November 2021. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_mobility_statistics (accessed 22 July 2026).

[29] Croatian Energy Regulatory Agency (HERA); Annual Report for the Year 2025. godinu. Zagreb, June 2026. https://www.hera.hr/hr/docs/HERA_izvjesce_2025.pdf (accessed 22 July 2026).

[30] Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., and Gallagher, K. G.; The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. Energy & Environmental Science, 8, 158–168, 2015. doi:10.1039/C4EE03029J.

[31] Buberger, J., Estaller, J., Wiedenmann, A., H¨ogerl, T., Grupp, W., Weyh, T., and Kuder, M.; Total cost of ownership and external cost assessment of commercially available vehicles in Germany. Sustainability, 18(1), 170, 2026. doi:10.3390/su18010170.

[32] GlobalPetrolPrices, https://www.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/ (accessed 22 July 2026).

[33] Johnson, E.; A carbon footprint of HVO biopropane. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 11, 887–896, 2017. doi:10.1002/bbb.1796.

[34] Menezes, N. de A., Cunha, I. L. C., dos Santos, M. T., and Kulay, L.; Obtaining bioLPG via the HVO route in Brazil: A prospect study based on life cycle assessment approach. Sustainability, 14, 15734, 2022. doi:10.3390/su142315734.

Klimatske promjene i prirodni plin
Climate Change and Natural Gas

S. Franjić

Nezavisni istraživač, Hrvatska

E-mail: sinisa.franjic@gmail.com

Sažetak
Prirodni plin jedan je od najšire korištenih i najtraženijih esencijalnih nositelja energije na Zemlji. Ovaj izvor energije, jedinstven po svojim biološkim i financijskim svojstvima, održivo se koristi za proizvodnju topline i energije, kuhanje, rasvjetu i kao gorivo za vozila. Korištenje prirodnog plina jedan je od ključnih i najuvjerljivijih mjera za borbu protiv klimatskih promjena i unapređenje kvalitete zraka.

Ključne riječi: prirodni plin, klimatske promjene, staklenički plin, metan, opasnosti

Abstract
Natural gas is one of the most broadly utilized and most wanted essential energy carriers on Earth. This energy source, one of a kind in its biological and financial properties, is viably utilized for the generation of warm and power, cooking, lighting and as a fuel for vehicles. The utilize of characteristic gas is one of the key and most compelling arrangements for combating climate change and progressing discuss quality.

Key words: Natural Gas, Climate Change, Greenhouse Gas, Methane, Hazards

1. Introduction
Natural gas (NG) is simple to utilize, transport, and store [1]. It has wide and diverse applications in the vitality and mechanical segments. In spite of the fact that renewable sources of energy are developing quickly, the worldwide request for NG is advance expanding to bolster energy utilization. The development of world-proven NG saves meets the worldwide energy requests for the prospective decades. It plays a potential part in the speeding up of the world's move to low-carbon energy frameworks. It displaces the part of coal in the energy division and is considered a low-carbon energy source, particularly when combined with carbon capture, use, and storage (CCU). NG is considered the "bridging fuel" to the net-zero carbon outflow world.

2. Components

The primary component of common gas is methane, which is the essential unit of the hydrocarbon material [1]. Methane is a colorless, indistinct, and odorless combustible gas. It gives off a huge amount of energy when it is burned. This is due to the tall quality of the methane bonds. It is considered a secure and ecologically friendly source of energy. It transmits lower sums of contaminants compared with other fossil powers (petroleum and coal). It is nontoxic and somewhat water-soluble; when shaped beneath water, it quickly moves to the water's surface by means of effervescence and is generally oxidized by microscopic organisms (methanotrophic).

Methane is a greenhouse gas agreeing to the Kyoto Protocol. It is a short-lived strong gas compared to CO_2. This is due to its oxidation by the hydroxyl radicals in the environment, which are shaped by the photodissociation of ozone, and at that point its response with water vapor. The response between CH_4 and the Gracious outspread is an sign of the CH_4 emanation in the air. Almost 90% of air methane is diminished from the troposphere through the response with the Gracious radical, coming about in the arrangement of formaldehyde (CH_2O), carbon monoxide (CO), and tropospheric ozone (O_3). As the CH_4 emanations increment, the Goodness radicals diminish. Additionally, climatic methane can respond with the energized state of the Oh radicle (O1D) and with the stratospheric chlorine atoms (Cl). The abundance methane will exist as a long-lived GHG.

Natural gas, a low-carbon fossil fuel, is fundamental to the green energy move [2]. Slowing climate warming for an amplified period requires utilizing common gas to progress discuss quality by decreasing carbon dioxide emanations compared to conventional fossil powers. The characteristic gas industry wants to upgrade the effectiveness of utilize advance, successfully control the upstream, center, and downstream greenhouse gasses and give a clean environment for the entire fabricating arrangement to proceed the interest of advertise control. All through the forecast interim, the expended gas every year will increment in different locales of a few nations, which demonstrates that the advertise of the devoured gas has room for extra enhancement. In arrange to confront this circumstance and the proceeding needs of most nations, the concerned nations must have persistent worldwide collaboration in different areas of energy. The commonsense investigate is to enact the essential communication channels, moment cleaner and more expanded common gas, and increment their generation or moment capacity to keep pace with the future development and persistent request for natural gas. Specialists and analysts accept that the future of characteristic gas looks exceptionally promising. Given the earnestness of the current natural issues and the challenges of climate change, carbon-intensive fossil fuels without a doubt lose their attractiveness and involve the energy move at the best of the needs of different governments. Natural gas is a cheap and helpful approach in the brief term as an alternative fuel until long-term arrangements are found with 100% clean energy objectives are reached.

3. CO_2 Removal

Few toxins are in common gas beneath underground settings (CO_2, H_2S, CO, mercaptans) [3]. Since of the comparatively low unbiased energy substance per unit of mass,

transmission appears costly. Transporting gas from the wellhead to clients through channels during the gas phase is not temperate. Liquefied natural gas (LNG) transport represents the more reasonable way of transportation. The method requires low temperatures (-161°C) and air weight. CO_2 remains in common gas at such temperatures (-161°C). If any CO_2 remains in the LNG, it will solidify on the exchanger surface of the channels, discouraging lines and bringing down plant performance.

Consequently, CO_2 must be evacuated some time recently the liquefaction handle to avoid CO_2 from solidifying, anticipate hardware erosion, and keep up a sound climate. CO_2 fundamentally contributes to climate alter and worldwide warming as a greenhouse gas; it needs considerable exertion to restrain CO_2 emanations into the climate. Ordinarily, one or more of the taking after forms are utilized to expel CO_2 from CO_2-rich normal gas: (i) chemical assimilation; (ii) physical absorption (PA); (iii) MP (Membrane Permeation); (iv) gas-liquid membrane contactors (GLMCs); and (v) CD (cryogenic distillation). The fundamental byproduct of CA (Cellulose acetate), which recovers the dissolvable in a single column beneath low weight, is CO_2. At the same time, the other is utilized for dissolvable absorptionwith a chemical dissolvable, regularly an fluid alkanolamine like MEA (Monoethanolamine) or MDEA (Methyl-Diethanolamine). The tall rates of dissolvable distribution and the significant warm required for dissolvable recovery make preparing CO_2-rich NG challenging.

Furthermore, broad compression trains are required for EOR (Enhanced Oil Recovery) since CO_2 is extricated at low weight. Dad includes stages of high-pressure assimilation, and low-pressure recovery CO_2 is hence collected as a low-pressure stream. At tall halfway CO_2 weight, physical solvents have a tall CO_2 retention capacity; in any case, their CO_2/CH_4 selectivity is destitute, coming about in critical hydrocarbon misfortunes in expansion to the CO_2 item stream. Besides, CO_2-rich NG has issues with tall dissolvable distribution rates. Methyl ethers of polyethylene glycol, propylene carbonate, and methanol are utilized in the Rectisol, Fluor, and Selexol forms as the major PA solvents for CO_2 removal.

4. GWP

Global warming potential (GWP) is one of the emanation measurements utilized to evaluate toxin outflows commitments to climate warming [1]. This is relative to the amount of CO_2 as a reference gas communicated in the number of transmitted gas tones inside the same time outline (CO_2-equivalent). Agreeing to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), methane GWP may be calculated to be in the ranges of 84-86 and 28-34 inside a 20-year and 100-year time skyline, separately. This implies that after outflow, one ton of radiated CH_4 is proportionate to 84-86 tons of CO_2 inside a 20-year skyline (in terms of retaining warm). And since it is a short-lived GHG, its impact will be decreased after a longer-term time skyline (100 years), which will extend between 28 and 36 CO_2-equivalent.

Methane has an backhanded affect on climate alter. Its emanation leads to tropospheric ozone (a greenhouse gas), carbon dioxide, and stratospheric water vapor arrangements. CH_4 outflow relief decreases the ozone concentration in the environment and subsequently influence emphatically the climate change.

Methane emanation sources can be classified as common and anthropogenic assets. Common assets like wetlands, soils, freshwater (rivers, lakes), and geographical channels. whereas anthropogenic assets incorporate vitality from fossil fuel (oil, common gas, and coal) forms, farming wastes (biogas), strong wastes (landfill gas), and inadequate combustion of biomass.

5. Methane Emission

As methane is a greenhouse gas, its outflows contribute to worldwide warming [1]. Methane emanations are considered squandered vitality asset that ought to be utilized. Methane radiated into the climate would be from outlaw, vented, or inadequate combustion. Methane outflow sources from diverse segments are flexible and may be summarized as follows.

• In the oil and gas divisions, emanations seem be during generation, preparing, refinery, offices, flaring, transportation, or spillage (from components like valves and pumps).

• Fugitive methane outflows from coal mining might be delivered from coal creases some time recently mining, the mine working region, and the mine ventilation discuss. The ventilation of airborne methane contributes to a huge rate of all processes.

• Methane flux was identified during the hydrofracking prepare for shale gas generation. Methane transmitted from shale gas, as in routine gas, might be from schedule venting, spillage, handling, and storage.

• Outlaw methane can be identified from a few sources in biogas: during digestate capacity, digesters, flares, and irregular leakage. Gas handling office plan must be created to diminish criminal gas outflows. Methane outflow relief methodologies will shift concurring to the territorial outflow source. For case, in urban cities, it will depend on the action of each city.

6. Methane Hydrates

Estimates of the worldwide stock of methane hydrates have surpassed 1019 g of carbon, which is comparable with the gauges of possibly recoverable coal, oil, and natural gas [4]. The estimate of this sort of asset has persuaded theories almost a discharge of methane in reaction to climate alter. Increments in temperature or diminishes in weight (through changes in ocean level) tend to separate the hydrate, in this manner discharging methane into the near-surface environment. In truth, such discharges of methane from clathrate have been conjured to clarify sudden increments in the barometrical concentration of methane during the final frosty cycle.

On a unit volume premise, gas hydrates contain a high amount of gas. For illustration, 1 cubic yard of hydrate disassociates at surrounding temperature and weight to frame around 160 cubic yards (4320 ft3) of natural gas also 0.8 cubic yards (21.6 ft3) of water. The natural gas component of gas hydrates is regularly overwhelmed by methane, but other natural gas components (e.g., ethane, propane, and carbon dioxide) can moreover be consolidated into a hydrate. The beginning of the methane in a hydrate can be either thermogenic gas or biogenic gas. Bacterial gas shaped during early digenesis of natural matter can ended up portion of a gas hydrate in continental shelf sediment. So also, thermogenic gas spilling to the surface from a profound thermogenic gas aggregation can shape a gas hydrate in the same mainland rack sediment.

Generally, methane hydrates are common constituents of the shallow marine geosphere, and they happen both in profound sedimentary structures, and shape outcrops on the ocean floor. Methane hydrates are accepted to frame by relocation of gas from profundity along geographical flaws, taken after by precipitation, or crystallization, on contact of the rising gas stream with cold seawater. When penetrating in characteristic gas-bearing and in unrefined oil-bearing arrangements submerged in profound water, the store gas may stream into the well bore and frame gas hydrates owing to the low temperatures and tall weights found during profound water penetrating. The gas hydrates may at that point stream upward with drilling mud or other released liquids. When the hydrates rise, the weight in the annulus diminishes and the hydrates separate into gas and water. The fast gas expansion ejects liquid from the well, decreasing the weight encourage, which leads to more hydrate separation (some of the time unstable separation) and assist liquid ejection.

7. Hazards

The apparent impact of hazardous emissions on climate change is the immovable and tireless worldwide warming involvement over the globe [5]. Worldwide warming has a serial impact on nourishment security, ice sheet softening, creature killing, climate, and plant harm. Basically, worldwide warming influences numerous biological systems. Methane spillages from generation wells amid penetrating, tailpipes, and transportation pipelines have been detailed to run between 2% and 10% of the add up to life cycle outflows. Methane has a much higher impact on radioactive forcing relative to CO_2, it is moreover 34 times more grounded than CO_2 at catching warm over a period of 100 years and 86 times more grounded over 20 years. Information capture, securing, and sum of methane leakages from a few characteristic gas extraction foundations over the world stay questionable. In any case, methane has been detailed to account for up to 30% of the tireless worldwide warming temperature. Hence, with the disclosure of unused characteristic gas stores and the establishment of modern extraction and advancement offices, chances are tall that more unquantified methane gasses will be transmitted with the inciting result of expanded worldwide warming temperature as a result of natural gas extraction.

8. IPCC

Due to the pollutions in sour natural gas, this must be treated by expelling the corrosive gasses some time recently its transportation to the diverse shoppers [6]. In common, some time recently being sold, natural gas must be treated to evacuate the carbon dioxide (CO_2) and hydrogen sulfide (H_2S) display in the gas and accomplish the concentration satisfactory for its dissemination. This handle is known in businesses as characteristic gas sweetening or corrosive gas expulsion. Routine evacuation advances are utilized to expel the corrosive gasses from common gas where the agent weight and temperature play an imperative part in the partition of these components. For the most part talking, characteristic gas needs to be treated some time recently any application and, for this reason, it must accomplish worthy conditions. Each nation has its enactment to control the determinations for the dispersion

and utilization of common gas. Various forms exist to apply in the characteristic gas treatment and fulfill these bound values especially in respect to CO_2 and H_2S compositions. Different innovations can be connected in the handle to isolated carbon dioxide and hydrogen sulfide from characteristic gas. The treatment to remove acid gasses (CO_2, H_2S) is named sweetening innovation. The nearness of the corrosive gasses causes a few issues in the transportation like the erosion of the pipelines. Another related issue is the diminish in the calorific esteem, which influences the financial potential and lively productivity of the whole handle. Besides, the world's consideration toward climate alter has driven to care for the CO_2 outflows into the climate and the interface of the conditioning advances. Most critically, an examination realized by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and by the International Energy Agency uncovered the significance of investigate and venture in CO_2 capture innovations. In this respect, it is vital to consider its transportation and utilize or capacity to be able to manage the issues of climate change. Other than, the IPCC notices that our planet needs to keep up the worldwide temperature increments beneath 1.5°C, and the suggested innovations are related with carbon capture and storage.

9. Energy Efficiency

The objective of energy proficiency was also connected to those of ensuring the environment, such as the presentation of the Save program, which required constraining carbon emanations by moving forward vitality proficiency [7]. In spite of the fact that the security of environment was considered as the major basis for presenting a arrangement of measures on vitality proficiency, the content of the laws recognizes their pertinence for security of vitality supply as well. For example, paragraph 15 of the second Save Program Mandate explicitly alludes to the 'positive affect that made strides vitality effectiveness has on security of energy supply.' This reference to energy security is coherent as the more prominent the number of energy-efficient measures are put in put, and the more energy is utilized reasonably, the less energy is devoured. This being said, the need of utilizing energy effectiveness measures is said to go hand in hand with other destinations, such as welfare, as it is accepted that 'through the utilize of these measures, those billions that are not went through on energy, interprets as net sparing and contributes to the increment in occupations and superior living conditions for EU citizens'

The moment gather of measures are those related to the utilize of renewable sources of energy, such as biomass, sun based, hydro, geothermal, and wind energy. Due to the tall significance the EU connects to handling the issues of climate alter, the utilize of renewable sources got to be a key need in EU energy policy-making. In spite of the fact that the (European) Commission recognizes the numerous points of interest of utilizing fossil powers, such as their cheap extraction, their helpful utilize, their wide accessibility, the presence of their conveyance framework and well-organised businesses, they also admit that they transmit pollutants and greenhouse gasses causing climate change and they increment security dangers. For the last mentioned concern of security, the Commission recommends that the objective is not to decrease consequence reliance but to increment enhancement of sources and advances, which would contribute to way better security of vitality supply.

However, the utilize of renewable vitality among the EU Member States has remained minimal, but in the two old-fashioned sources of power from hydropower, and conventional employments of wood for warming. In spite of the fact that the utilize of bio-fuels has been over and over raised as the best substitute for oil, particularly in the transport segment, its utilize has moreover been minimal. The to begin with issue driving to such a low utilize of renewable sources has been recognized as the financing of this sort of vitality and the reality that Community has as it were restricted implies to back its advancement. This issue, along with a need of satisfactory advances to completely render the utilize of such sources important in comparison to fossil fuels, and the need of open bolster due to the still prevailing energy to utilize fossil fuels, have contributed to the sluggish development of renewable sources in Europe. It is clear, subsequently, that until technologies improve, demeanors towards the utilize of renewable sources will not alter. Political will does not right now exist to back the utilize of renewable sources, in this way these sources will have trouble in taking off and getting to be competitive with fossil fuels. Until that time, they will posture no danger to the utilize of customary sources, and concern over the issue of security of energy supply will proceed to persist.

10. Conclusion

Natural gas is a mixture of hydrocarbon gasses, basically methane, with littler amounts of other follow gasses such as ethane, propane, butane and nitrogen. Natural gas is considered a cleaner fuel than coal and oil since it produces less greenhouse gas outflows when burned. Natural gas can be created misleadingly by different strategies. Biogas can be gotten from the deterioration of normal human waste, landfills and from animal farms. There are moreover a few innovations for misleadingly synthesizing the gas, subsequently contributing to the enhancement of common gas sources. These strategies offer elective and maintainable approaches to misusing gas for energy purposes.

11. References

[1] Sakr, A. A. E. (2024.): „Natural gas resources, emission, and climate change“ in Rahimpour, M. R.; Makarem, M. A.; Meshksar, M. (eds): „Advances in Natural Gas Formation, Processing, and Applications, Volume 1 - Natural Gas Formation and Extraction“, Elsevier Inc., Amsterdam, Netherlands, pp. 19. – 34.

[2] Ghasem, N. (2024.): „Introduction to high-value chemicals and energy production from natural gas“ in Rahimpour, M. R.; Makarem, M. A.; Meshksar, M. (eds): „Advances in Natural Gas Formation, Processing, and Applications, Volume 7 - Natural Gas Products and Uses“, Elsevier Inc., Amsterdam, Netherlands, pp. 15. – 16.

[3] Saidi, M.; Farokhi,G. (2024.): „Modeling and simulation of CO_2 removal from CO_2-rich natural gas via supersonic separators“ in Rahimpour, M. R.; Makarem, M. A.; Meshksar, M. (eds): „Advances in Natural Gas Formation, Processing, and Applications, Volume 8 - Natural Gas Process Modelling and Simulation“, Elsevier Inc., Amsterdam, Netherlands, pp. 109. – 110.

[4] Speight, J. G. (2019.): „Natural Gas - A Basic Handbook, Second Edition“, Gulf Professional Publishing, Elsevier, Cambridge, USA, pp. 62.
[5] Jimoh, M. O.; Arinkoola, A. O.; Salawudeen, T. O.; Daramola, M. O. (2024.): „Environmental challenges of natural gas extraction and production technologies“ in Rahimpour, M. R.; Makarem, M. A.; Meshksar, M. (eds): „Advances in Natural Gas Formation, Processing, and Applications, Volume 1 - Natural Gas Formation and Extraction“, Elsevier Inc., Amsterdam, Netherlands, pp. 89.
[6] Gutierrez, J. P.; Torres, F. B.; Erdmann, E. (2024.): „Cryogenic fractionation for natural gas sweetening“ in Rahimpour, M. R.; Makarem, M. A.; Meshksar, M. (eds): „Advances in Natural Gas Formation, Processing, and Applications, Volume 2 - Natural Gas Sweetening“, Elsevier Inc., Amsterdam, Netherlands, pp. 185. – 186.
[7] Haghighi, S. S. (2007.): „Energy Security - The External Legal Relations of the European Union with Major Oil and Gas Supplying Countries“, Hart Publishing, Portland, USA, pp. 107. – 109.

Proizvodnja biometana u funkciji zelene energetske tranzicije
Biomethane production as a function of the green energy transition

K. Marijanović [1,*], D. Pudić [2], D. Bukvić [1], I. Grozdanić [3], M. Stojkov [4]

[1]Brod-Plin d.o.o., Slavonski Brod, Hrvatska
[2]GPZ d.o.o., Zagreb, Hrvatska
[3]Turbomehanika d.o.o., Zagreb, Hrvatska
[4]Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: kmarijanovic@brod-plin.hr

Sažetak
Na početku rada prikazana je proizvodnja bioplina na pročišćivaču otpadnih voda procesom anaerobne digestije (AD) u Slavonskom Brodu. Obradom novonastalog bioplina do razine obnovljivog prirodnog plina biometana osigurava se visokovrijedni izvor energije primjenjiv u gospodarstvu po uzoru na zapadno europske zemlje. Primjenom obnovljivog biometana, prirodni plin ulazi u sferu obnovljivih izvora energije (OIE).
Kroz povijesni prikaz nastanka bioplina, njegovu zastupljenost i aktualno stanje bioplinskih postrojenja u Europi i Republici Hrvatskoj posljednjih godina bioplin i biometan mogu biti dostojna nadopuna i zamjena prirodnom plinu.
Usporedbom potrošnje stlačenog prirodnog plina i novonastalog biometana s primjenom u vozilima Brod-plin-a želi se istaknuti njegov visokovrijedni potencijal za sektor prometa. Usporedbom emisija CO_2 stlačenog prirodnog plina i obnovljivog biometana naglasak je na višestrukom smanjenju vrijednosti emisija kao najvećem prednosti ove primjene.

Ključne riječi: anaerobna digestija, biometan, emisije CO_2, obnovljivi izvori energije, sektor prometa

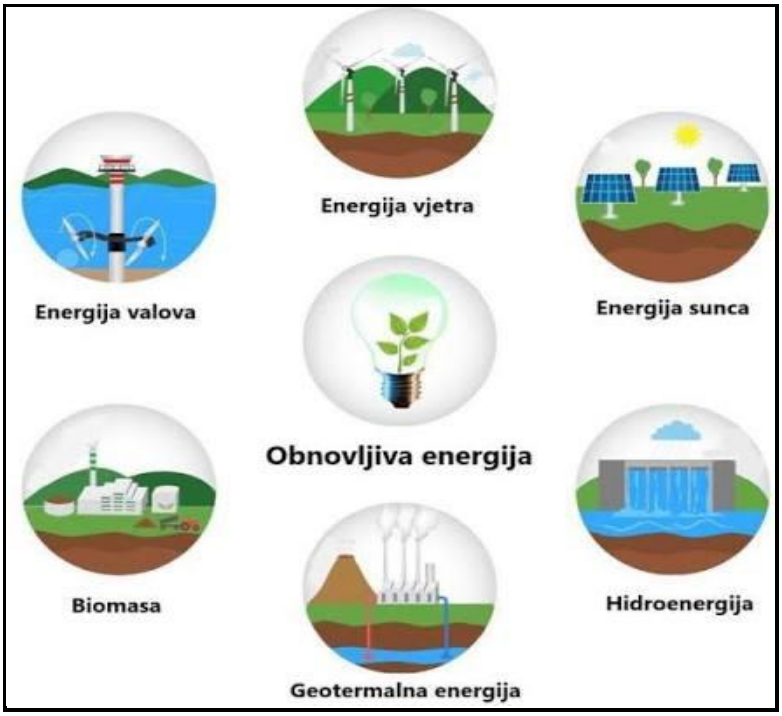
Abstract
At the beginning of the paper, the production of biogas at the wastewater treatment plant by the process of anaerobic digestion (AD) in Slavonski Brod was presented. By processing the newly formed biogas to the level of renewable natural gas biomethane, a high-value source of energy applicable in the economy is ensured, following the example of Western European countries. By using renewable biomethane, natural gas enters the sphere of renewable energy sources (RES).

Through the historical presentation of the origin of biogas, its representation and the current state of biogas plants in Europe and the Republic of Croatia in recent years, biogas and biomethane can be a worthy supplement and replacement for natural gas.
By comparing the consumption of compressed natural gas and newly created biomethane with the use in Brod-plin vehicles, our aim is to highlight its high value potential for the transport sector. By comparing the CO_2 emissions of compressed natural gas and renewable biomethane, the emphasis is on the multiple reduction of emissions as the biggest benefit of this application.

Key words: anaerobic digestion, biomethane, CO_2 emissions, renewable energy sources, transport sector.

1. Uvod

Energetski smjer današnjice razmatra smanjenje uvoza fosilnih goriva koje se nastoji nadoknaditi proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora (OIE) pri čemu se koriste prirodni resursi kao sunce, vjetar, voda i biomasa, (Slika 1.).



Slika 1. Obnovljivi izvori energije [1]

Prometni sektor kao dio gospodarstva s velikom potrošnjom energije provodi proces dekarbonizacije i prelazak na alternativna goriva poput električne energije, biogoriva i vodika. Upravo primjenom navedenih vrsta goriva i oblika energije smanjuje se potreba za korištenje fosilnih goriva i ovisnost o jednom izvoru energije tzv. diversifikacija izvora.
Jedan od takvih primjera je bioplin odnosno biometan koji već nekoliko desetljeća pokazuje potencijal među obnovljivim izvorima energije njegova dobra pozicija kao nadopuna i zamjena prirodnom plinu. Kroz njegovu proizvodnju i primjenu u prometnom sektoru

koristeći postojeću plinska vozila i izgrađenu plinsku infrastrukturu punionica SPP-a direktno se utječe na smanjivanje emisija stakleničkih plinova.

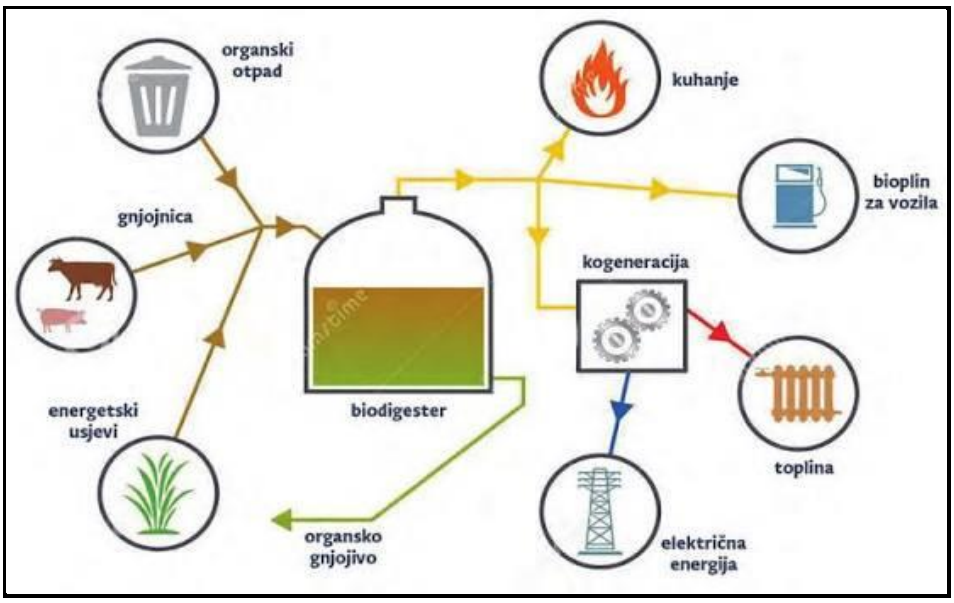
2. Energetska tranzicija kao prigoda za prirodni plin

Današnje suvremeno društvo opterećeno je stalnim i kontinuiranim porastom nastajanja organskog otpada i rješavanjem problema zaštite okoliša. U mnogim zemljama imperativ je njegovo sprječavanje nastanka i lakše upravljanje. Poduzete aktivnosti zahtijevaju velike napore s ciljem ublažavanja globalnih klimatskih promjena.

Kroz kontrolirano odlaganje otpada uređuju se standardi za njegovu iskoristivost odnosno uporabu odnosno povrat energije. Dobar primjer je proizvodnja bioplina iz procesa anaerobne digestije (AD) nastalog na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda iz ostatka obrade odnosno mulja.

Proces anaerobne digestije (AD) je mikrobiološki proces razlaganja organske tvari bez prisutnosti kisika, koji je uobičajen u prirodnom okolišu, a danas se naveliko primjenjuje u proizvodnji bioplina.

Proces proizvodnje bioplina anaerobnom digestijom (AD) optimalni je proces za tretiranje biorazgradivog organskog otpada i njegova pretvorba u vrijedan obnovljivi energent (bioplin) i ekološki prihvatljivo gnojivo (digestat), (Slika 2.).



Slika 2. Proces anaerobne digestije (AD) [2]

Uobičajeno je iskorištavanje digestata za odlaganje na poljoprivrednim zemljištima kao visokokvalitetno dušično gnojivo vraćajući hranjive tvari u tlo uz striktno poštivanje kvalitete i zakonskih propisa o dopuštenim vrijednostima teških metala i drugih štetnih tvari.

Iskorištavanje bioplina:

- za proizvodnju električne energije,
- toplinske svrhe grijanja,

kao pogonsko gorivo motornih vozila kao zamjena za stlačeni prirodni plin.

3. Prvi počeci nastanka bioplina i integracija u energetski sustav

Prvi spomen zapaljivog plina koji nastaje raspadanjem organske tvari bez kisika bio je još u 17. stoljeću, a u 19. stoljeću se stvaraju preduvjeti za njegovo korištenje i primjenu. Proizvodnja i sakupljanje bioplina iz biološkog postupka prvi put je dokumentirana u Velikoj Britaniji 1895. godine (Metcalf i Eddy, 1979). Od tog vremena pa do danas postupak se razvijao te je postao široko rasprostranjena metoda obrade otpadnih voda i stabilizacije otpadnog mulja, [3].

U proteklim godinama svjedoci smo energetskih kriza koje su jednostavno ponudile mogućnosti energetskim izvorima s dobrom fleksibilnosti. Upravo je prirodni plin takav izvor, karakteristikama lako prilagodljiv drugim vrstama korisne energije i velikim prednostima svoje obnovljive komponente bioplina. Upravo prvo spominjanje zamjene prirodnog plina bioplinom nastalim iz obnovljivih izvora energije počela se spominjati 70-tih godina prošlog stoljeća. Stvaranjem strategija Zelenog europskog plana i klimatske neutralnosti do 2050. godine transformira se gospodarstvo u moderno, učinkovito i konkurentno s naglaskom na osiguranje zaštite okoliša i zdravlja građana.

Bioplin nastao anaerobnom digestijom (AD) kroz smjernice energije i transporta svojim vrhunskim performansama predstavlja ogroman potencijal čiste energije i odličnu poziciju u usporedbi s drugim biogorivima kao bioetanol ili biodizel. Kroz obnovljivo podrijetlo, bioplin kao CO2 neutralan obnovljivi izvor osigurava postupno smanjivanje ugljičnog otiska primjenom postojeće infrastrukture, a što zahtjeva male troškove i ulaganja. Povećanjem broja proizvođača bioplina raste njegova važnost u konačnici i velika korist od proizvodnje i same primjene. Primjenom bioplina izravno se rješavaju problemi zagađenja okoliša, podržava se ruralni razvoj te pomaže poljoprivredni i industrijski sektor.

4. Zastupljenost infrastrukture bioplinskih postrojenja

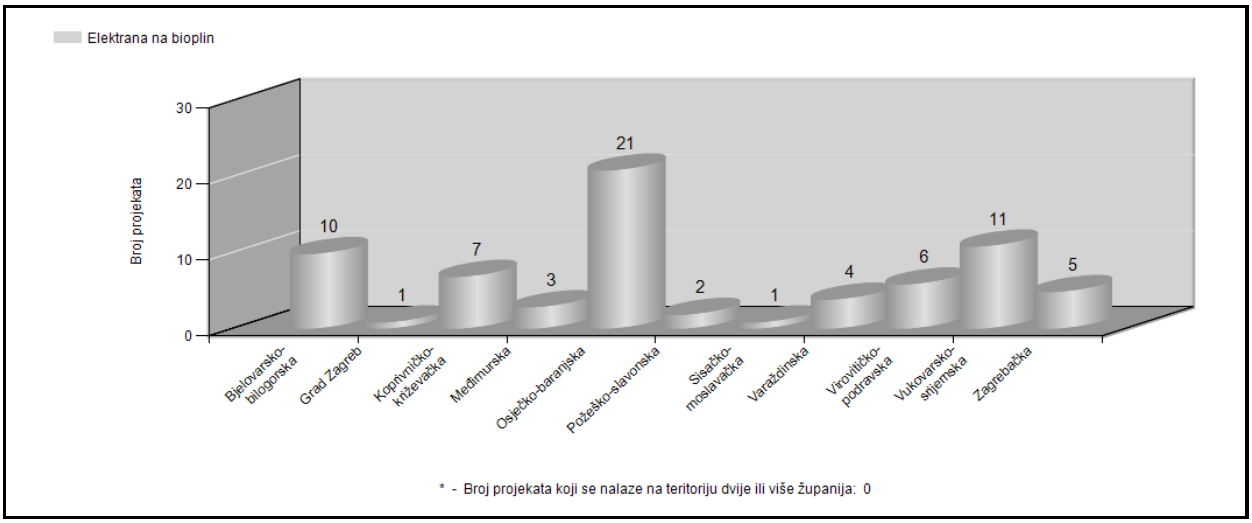
U Hrvatskoj proizvodnja i primjena bioplina manje je zastupljena u dinamičnom sektoru obnovljivih izvora energije (OIE) s isporukom oko 10-tak % električne energije u ukupnom broju elektrana. Sredinom 2009. godine je registriran rad prva tri bioplinska postrojenja s primjenom sirovine poljoprivrednog porijekla i sa statusom povlaštenog proizvođača električne energije. Sve do danas evidentan je broj povećanja takvih postrojenja za proizvodnju bioplina i primjene u finalnoj proizvodnji električne energije.

Danas prema Registru OIEKPP Ministarstva zaštite okoliša i zelene tranzicije brojimo 71 bioplinsko postrojenje u Republici Hrvatskoj. Današnja situacija na tržištu nažalost dovela je gotovo sva bioplinska postrojenja na rub opstanka, [4].

Posljednjih dva desetljeća velika su ulaganja u dijelu komunalne infrastrukture i izgradnju pročistača otpadnih voda kao dobrih izvora za proizvodnju bioplina. Kroz primjer postrojenja u Zagrebu i Osijeku ostvaruje se potencijal nastalog bioplina iz obrade otpadne vode koji se preusmjerava u proizvodnju električne energije. Ostali gradovi tek trebaju slijediti takve primjere iskorištavanja potencijala iz proizvedenog bioplina. Kroz korištenje infrastrukture za proizvodnju bioplina ostvaruju se i dobre mogućnosti za primjenu u drugim sektorima s visokom potrošnjom energije naprimjer prometa.

Stoga se mora iskoristiti inicijativa i plan otvaranja mogućnosti s proizvodnjom i prenamjenom proizvedenog obnovljivog izvora bioplina upravo prema sektorima s najvećom

potrošnjom energije. U aplikaciji Registra OIRKPP Ministarstva zaštite okoliša i energetske tranzicije prikazane su lokacije smještaja bioplinskih postrojenja i elektrana u 2026 godini po županijama, (Slika 3.).



Slika 3. Grafička analiza raspodjele projekata na području RH u 2026. godini [4]

Europa doživljava rast i jačanje korištenja te u razdoblju od 2020. do 2025. godine postoji značajna tendencija rasta bioplinskih postrojenja u Europi. Pri tome naglasak je na poljoprivredni sektor kao ključni izvor biomase s ciljem Europske unije i smjernicama Europskog zelenog plana. Upravo stoga u Europskoj uniji 71 % bioplinskih postrojenja iz poljoprivredne proizvodnje koristi nusproizvode kao primarni supstrat i ima glavnu ulogu u kontinuiranom rastu proizvedenog bioplina. Proizvodnja bioplina ima primjenu prvenstveno u proizvodnji električne energije i topline, [5].

Proizvodnja bioplina iz komunalnog otpada otpadnih i kanalizacijskih voda najviše se bilježi u razvijenim europskim zemljama koje usmjeravaju proizvodnju kroz sektore grijanja domaćinstava i promet. Prosjek proizvodnje bioplina je od 40-90 kWh/stanovniku pri čemu se najviše ističu Njemačka i Švedska. U prijašnjim godinama kroz poticajne mjere i porezne olakšice u vidu oslobađanja cestarina, smanjenja poreza i na strani proizvodnje odnosno potrošnje, nastoji se potaknuti što veća proizvodnja bioplina odnosno biometana. Ono što je otegotna okolnost za još jači i snažniji rast bioplina su „nejedinstvene politike zemalja“ kroz različitost visina oblika subvencija država.

Postrojenja za biometan iz godine u godinu što pokazuju podaci Europske karte biometana. Tijekom 2024. godine aktivno je 1548 postrojenja što predstavlja rast od 32% broja postrojenja u Europi. U usporedbi s prethodnim izdanjem (2023. godina) koje je sadržavalo 1.174 postrojenja. Više od 80% prijavljenih postrojenja za proizvodnju biometana sada je spojeno na plinsku mrežu, pri čemu je gotovo polovica njih (49%) spojena na distribucijsku mrežu, a 14% na transportnu mrežu, [6].

Za 2025. i zaključno s lipanj 2026. godine Europska karta biometana navodi 1975 aktivna bioplinska postrojenja u Europi, (Tablica 1.).

Tablica 1. Aktivna bioplinska postrojenja u Europi zaključno s lipanj 2026. godine [7]

Zemlja	***Bioplinska postrojenja aktivna do sredine 2026. godine***
Austrija	20
Francuska	829
Njemačka	282
Madžarska	3
Nizozemska	92
Slovačka	5
Velika Britanija	129
Švedska	67
Švicarska	49
Ostatak Europe	499
Ukupno	**1975**

5. Potencijal postojećeg pročistača otpadnih voda

Kao što je već navedeno, proizvodnja bioplina na pročistačima otpadnih voda gradova Zagreba i Osijeka kroz obradu otpadne vode iz taloženog mulja primjenjuje se za proizvodnju električne energije, a jedan dio se koristi u toplinske svrhe. Drugi hrvatski gradovi još nisu iskoristili potencijal obnovljivog izvora energije, bioplina.

Ovdje je razrađen primjer uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u Slavonskom Brodu (UPOV) koje je izgrađeno 2016. godine i do danas vrši proces obrade otpadne vode grada Slavonskog Broda i okolice. Tehničkom izvedbom postrojenja kapaciteta 80.000 ES (ekvivalent stanovnika) godišnje obradi oko 8 milijuna m³ otpadne vode. Obuhvaća 3. stupanj pročišćavanja odnosno strožu obradu komunalnih otpadnih voda, a primjenom već 2. stupanja pročišćavanja postiže zahtjeve i za fosfor i za dušik prema Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda. Ovakvom obradom uređaja pročišćena otpadna voda odlazi u recipijent rijeku Savu i ne dolazi do ugrožavanja prirodnog stanja okoliša, [8].

Sva obrađena voda ispušta se ponovo u rijeku Savu blizu središta grada i gradskog kupališta.

Predviđeni procesi uređaja/pročistača za obradu vode su slijedeći:

- mehaničko pročišćavanje otpadne vode,
- biološko pročišćavanje otpadne vode,
- linija za mulj i proizvodnju prirodnog bioplina (digestor i spremnik).

Linija mulja je najzanimljivija faza odnosno obrada upotrebom procesa anaerobne digestije (AD) iz taložnog materijala iz kojeg se proizvodi bioplin za daljnju uporabu.

U cijelom procesu najvažniji su dijelovi dva digestora za smještaj i miješanje mulja, spremnika sirovog bioplina i same plinske baklje za rasterećenje sustava proizvedenog bioplina.

Procesi kod proizvodnje bioplina zahtijevaju zagrijavanje mase mulja na temperaturi od 38˚C u digestorima. Nastali bioplin iz digestora se dovodi do plinskog spremnika kapaciteta od 670 m^3, (Slika 4.), [8].

Slika 4. Plinski spremnik kapaciteta 670 m^3 [8].

Postrojenje je dimenzionirano za maksimalnu proizvodnju bioplina do 60 m^3/h. Bioplinski spremnik može zadržati pola dnevne proizvodnje bioplina. Tijekom jeseni odnosno zime proizvedeni bioplin se usmjerava prema kotlovnici odnosno plameniku za potrebe zagrijavanja poslovne zgrade. Tijekom cijele godine jedan manji dio sirovog bioplina služi za zagrijavanje mase mulja odnosno smjese u digestorima do temperature 38˚C. Zbog veće količine proizvodnje i smanjenog kapaciteta bioplinskog spremnika, velika količina bioplina se spaljuje na plinskoj baklji najvećim dijelom tijekom proljeća, ljeta i rane jeseni. Upravo tu leži potencijal za iskorištavanje spaljenog bioplina i njegovih viškova za daljnju obradu do razine pročišćenog biometana, (Slika 5.), [8].

Slika 5. Plinska baklja kapaciteta 100 m^3/h [8].

6. Obrada nastalog bioplina i stvaranje biometana

Kako bi se potaknulo iskorištavanje potencijala bioplina u potpunosti na pročistaču otpadnih voda tijekom 2025. godine izvršeno je uzorkovanje i analiza ovlaštenog laboratorija kako bi se utvrdila kvaliteta i prisutnost biometana CH_4. Kemijskom analizom utvrđena prisutnost od 66,9 % metana CH_4 u proizvedenom bioplinu postupkom anaerobne digestije (AD) iz mulja [9] , (Tablica 2.), [9].

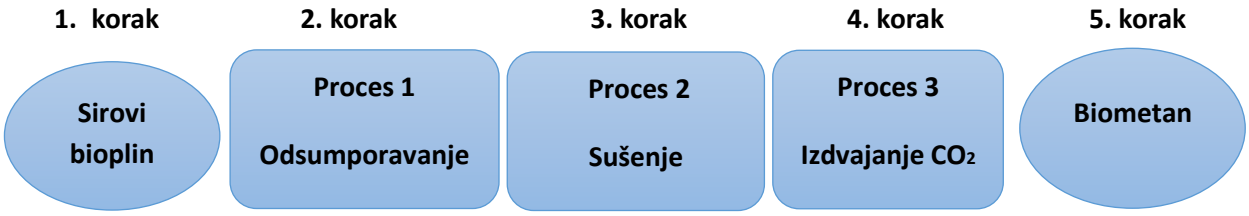
Tablica 2. Ispitni izvještaj ovlaštenog laboratorija i kemijski elementi u proizvedenom bioplinu, [9]

Mjerno mjesto: UPOV Slavonski Brod - izlaz iz digestora, 31.7.2025., 10:48					
Broj mjerenja / ***Parametar***	**Jedinica**	**1**	**2**	**3**	**Sr. vrijednost**
Temperatura zraka	°C	22,8	22,8	22,8	22,8
Tlak zraka	hPa	1016,3	1016,3	1016,3	1016,3
Ugljikov dioksid - CO_2	vol / %	32,6	32,5	32,5	32,5
Metan - CH_4	vol / %	66,8	66,9	66,9	66,9
Kisik - O_2	vo l / %	0,4	0,4	0,4	0,4
Vodikov sulfid - H_2S	ppm	266	265	251	260
Vodik - H_2	ppm	2074	2148	1912	2044
Mjerno mjesto UPOV Slavonski Brod - zbirni prikaz rezultata mjerenja					
Parametar	**Jedinica**	**Min.**	**Max.**	**Sr. vrijednost**	
Ugljikov (IV) oksid - CO_2	vol / %	32,5	32,6	32,5	
Metan - CH_4	vol / %	66,8	66,9	66,9	
Kisik - O_2	vol / %	0,4	0,4	0,4	
Vodikov sulfid - H_2S	ppm	251	266	260	
Vodik - H_2	ppm	1912	2148	2044	

Bioplin je smjesa plinova u kojoj najveći dio sačinjavaju CH_4 i CO_2 (90-99%) a ostalo (1-10%), sačinjavaju primjese poput H_2S, H_2, CO, NH3, NO_2, O_2. Za stvaranje visokokaloričnog plina moraju biti ispunjena dva važna preduvjeta: anaerobno okruženje i određena temperatura u bioreaktoru (30-37˚C) koja je određena prema tipu bakterija (metanogenih). Novonastali bioplin iz bioplinskog spremnika mora se dodatno obraditi i prilagoditi za daljnju upotrebu. To se radi uklanjanjem svih elementa koji loše mogu djelovati na materijale i elemente distribucijskog sustava ili motora za pogon vozila. Prilagodba bioplina podrazumijeva uklanjanje iz njega ugljikovog dioksida, sumpora da se dobije čisti metan. Koncentracija metana u bioplinu uobičajeno iznosi između 50-75 %. Da bi bioplin bio pogodan za plasman u distribucijski sustav plina koncentracija metana mora biti najmanje 95 %. Ovaj postupak naziva se dorada (pročišćavanje) bioplina u biometan, [10].
Bioplin dobiven anaerobnom digestijom (AD) obično sadrži uz 50-65 % vol. metana i 35-50 % vol. ugljikovog dioksida, 0-12 % vol. vodene pare te male količine ugljikovodika, dušika,

vodika, kisika, amonijaka i sumporovodika (moguće i Cl, F, Si…). Kako bi dobili energent vrlo sličan prirodnom plinu, primjenjuje se proces pročišćavanja bioplina.
Ovisno o sastavu dobivenog bioplina, obrada se vrši uklanjanjem ugljikovog dioksida, postupkom sušenje plina, odstranjivanjem supstanci u tragovima (kisik, dušik, sumporovodik, amonijak ili siloksani), te čestica koje mogu uzrokovati mehanička oštećenja u plinskim motorima, turbinama i cijevima uz pomoć finih mehaničkih filtera (0,01 μm – 1 μm). Procesima komprimiranja biometana na tlak potreban za njegovu daljnju uporabu, često postoji potreba za odorizacijom (ako se utiskuje u plinsku distributivnu mrežu prirodnog plina s niskim tlakom) ili povećanje toplinske vrijednosti (Wobbeov indeks) doziranjem propana.
Glavne tehnologije (koraci 2-4) kod procesa pročišćavanja bioplina su:

- odsumporavanje,
- sušenje,
- izdvajanje CO_2



Slika 6. Prikaz tehnoloških procesa pročišćavanja bioplina do razine biometana [12]

Završni proces skladištenja biometana u vidu plinskih boca pod visokim tlakom kao nepokretna ili mobilna izvedba (trailera) pod visokim tlakom poput stlačenog prirodnog plina za opskrbu vozila.
U slučajevima da se želi povećati udio metana i kako bi se uklonili nepoželjni sastojci poput CO_2, H_2S, vode i drugih nečistoća može se izvršiti obogaćivanje biometana (CH_4) dodavanjem prirodnog plina s konačnim rezultatom plina visoke energetske vrijednosti koji zadovoljava standarde za korištenje.

7. Godišnja proizvodnja obnovljivog bioplina i obrađenog biometana

Iako je sustav pročistača otpadnih voda dimenzioniran za proizvodnju bioplina od 60 m^3/h, stvarna proizvodnja je manja i zabilježena je stalnim praćenjem programskog Scada sustavom za nadzor. Prema njenim podacima proizvodnja bioplina tijekom 2025. godine na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda u Slavonskom Brodu prikazuje količinu bioplina, biometana prema udjelu od 66,9% ovlaštenog laboratorija nakon pročišćavanja. Samim procesom proizvodnje manji dio bioplina se koristi u postupku zagrijavanje mulja do 38 ˚C unutar dva digestora dok velika većina proizvodnje bioplina tijekom godine (ožujak-studeni) nema gotovo nikakvu iskoristivost kroz toplinske potrebe zagrijavanja zgrade UPOV-a, te se putem plinske baklje spaljuje i oslobađa prostor plinskog spremnika za novo proizvedeni bioplin. Također se postavlja pitanje do kada će se isti moći spaljivati. Upravo u tome leži inicijativa njegove iskoristivosti, daljnje obrade i uporabe u prometu.

Tablica 3. Proizvodnja bioplina tijekom 2025. godine prema podacima programskog sustava za nadzor Scada na UPOV Slavonski Brod

Godina 2025.	Proizvedena količina bioplina m³	Proizvedena količina biometana m³ (66,9% CH_4)	Količina biometana u MWh prema udjelu (udio 66,9% CH_4)	Proizvedena količina biometana kg
siječanj	3235	2164	23	1744
veljača	3665	2452	27	2027
ožujak	1690	1131	12	911
travanj	4238	2835	31	2320
svibanj	6596	4413	47	3501
lipanj	6683	4471	47	3500
srpanj	7590	5078	53	3975
kolovoz	6455	4318	45	3381
rujan	6773	4531	47	3551
listopad	7426	4968	54	4052
studeni	9382	6277	67	5030
prosinac	9399	6288	68	5122
Ukupno	**73.132**	**48.925**	**520**	**39.114**

8. Primjena obnovljivog biometana kod vozila na stlačeni prirodni plin (SPP)

Novonastali bioplin posjeduje potencijal za daljnju obradu do razine biometana i primjenu u prometu kroz mogućnost primjene kod vozila na stlačeni prirodni plin (SPP). TD Brod-plin d.o.o. posjeduje punionicu stlačenog prirodnog plina (SPP) za opskrbu lakih i teških motornih vozila na SPP, a koja radi na komercijalnoj bazi opskrbe korisnika takvih vozila. Trenutno u ponudi je samo stlačeni prirodni plin (SPP) fosilnog porijekla. Praksa od proizvodnje do potrošnje biometana u zemljama EU potiče na razmišljanje iskoristivost proizvedenog biometana na postojećoj punionici prirodnog plina u Slavonskom Brodu. Kako stlačeni prirodni plin nudi trajnu sigurnost, opskrba obnovljivim biometanom predstavljala bi dodatno gorivo u ponudi s smanjenom emisijom CO_2. Dodatnim ulaganjem u opremu za obradu i skladištenje na postojećem pročistaču u Slavonskom Brodu primjenom poznate tehnologije obrade bioplina do razine biometana te u konačnici integracijom na postojećem objektu punionice SPP.

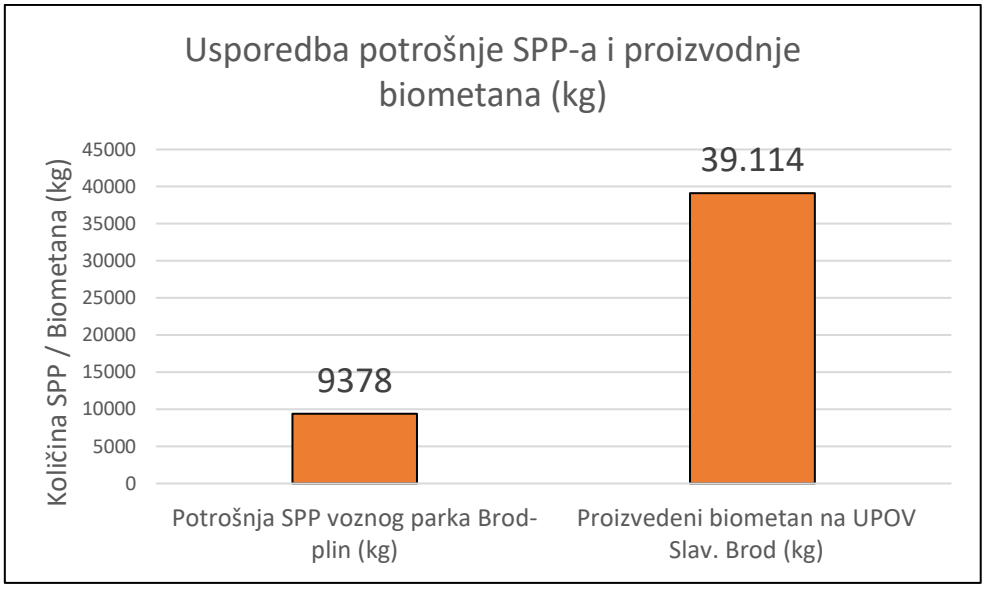
Radi boljeg uvida u potencijal proizvodnje bioplina i što boljeg osjećaja o količinama proizvedenim količinama na pročistaču otpadnih voda usporedili smo proizvodnju biometana s potrošnjom stlačenog prirodnog plina tijekom 2025. godine kroz primjer voznog parka Brod-plin-a kojeg čini 13 vozila na SPP. Tablicom 4. prikazani su podaci potrošnje tijekom 2025. godine jednog od korisnika punionice, odnosno vozila Brod-plin-a. Na Grafu 1. je prikazana grafička usporedba potrošnje stlačenog prirodnog plina tijekom 2025. godinu u voznom parku Brod-plin-a sa proizvedenim biometanom. Korišteni su podaci iz izvještaja o poslovanju odnosno prodaji/potrošnji stlačenog prirodnog punionice SPP-a.

Korist od proizvodnje biometana je njegova s primjenom u prometu osigurava primjenu obnovljivog izvora energije koji je idealna supstitucija fosilnim gorivima te osigurava aktivno sudjelovanje u dekarbonizaciji prometa i smanjenjue emisija CO_2. Već primjenjiva tehnologija obrade bioplina s upotrebom tehnike pročišćavanja bioplina i primjenom iskustava i znanja, stvaraju se preduvjeti za implementaciju i uvođenje na punionici SPP-a.

Tablica 4. Potrošnja voznog parka Brod-plin d.o.o. tijekom 2025. godine

Godina 2025.	*Potrošnja SPP-a vozila Brod-plin (13 vozila) (MWh)*	*Potrošnja SPP-a vozila Brod-plin (13 vozila) (kg)*
siječanj	6,9	639
veljača	8,0	732
ožujak	7,2	675
travanj	9,8	901
svibanj	9,4	891
lipanj	9,5	915
srpanj	9,4	899
kolovoz	5,1	493
rujan	7,9	759
listopad	9,5	874
studeni	9,1	856
prosinac	8,1	744
Ukupno:	***100***	***9378***

Graf 1. Usporedba potrošnje SPP-a i proizvodnje biometana, [13]



Nadopunom i zamjenom za prirodni plin primjenom biometana i uspostavljanja kružne ekonomije organski otpad pretvara se u održivu energiju visoke vrijednosti zatvarajući ciklus od otpadnih tvari, proizvodnje pa sve do zadovoljavanja energetskih potreba.

Upotrebom stlačenog biometana kod vozila na stlačeni prirodni plin osigurano je mjesto potrošnje uz znatno smanjivanje emisija CO_2 i snažna poruka skupljim ekološkim rješenjima u prometu.

Koncept „od otpada do biometana“ s upotrebom biometana i digestata omogućeno je smanjivanje otpada i potpuna korisnost dobivenog proizvoda, a što opravdava ovakvu inicijativu, [11].

9. Smanjivanje emisija CO_2 kao bitni čimbenik primjene biometana u prometu

Prednost primjene obnovljivog biometana u prometu ima ključnu ulogu smanjenja emisija ugljičnog dioksida (CO_2) i drugih stakleničkih plinova.

Kroz usporedbu potrošnje stlačenog prirodnog plina tijekom 2025. godine te komparacijom stlačenog biometana vozilima Brod-plin-a višestruko se smanjuje ugljični otisak u odnosu na prijeđene kilometre. Radi se o prosječnim godišnjim prijeđenim udaljenostima od 10.000 km/vozilu. Za ukupno 13 vozila iznosi okvirno 130.000 kilometara.

Prednost u smanjivanju emisija biometana je izgaranje CO_2 (ostaje otopljen u tekućoj fazi mulja), dok drugi dio se izdvaja pri samoj obradi bioplina u biometan.

Prikazom usporedbe ugljičnog otiska stlačenog prirodnog plina fosilnog porijekla i stlačenog biometana osigurava se opravdanost ulaganja u pokretanje projekta iskorištavanja obnovljivog bioplina dobivenog na pročistaču otpadnih voda, (Tablica 5.). Ovdje treba naglasiti da prilikom sagorijevanja 1 kg prirodnog plina nastanu emisije od 2,75t CO_2, dok kod 1 kg bioplina iznose 0-0,2t CO_2, prema IPCC metodologiji (IPCC NGGIP).

Tablica 5. Usporedba emisija CO_2 vožnjom na SPP i biometan (Bio-SPP) za 2025. godinu

Punionica SPP Slavonski Brod			Proizvodnja biometana
Godina 2025.	**Potrošnja SPP-a vozila Brod-plin 2025 (13 vozila)**	**Emisije CO_2 - SPP (2,75 kg CO_2)**	**Emisije CO_2 - Bio-SPP (0,2 kg CO_2) uz operativne emisije**
siječanj	639	1757	128
veljača	732	2012	146
ožujak	675	1857	135
travanj	901	2478	180
svibanj	891	2450	178
lipanj	915	2517	183
srpanj	899	2473	180
kolovoz	493	1356	99
rujan	759	2087	152
listopad	874	2404	175
studeni	856	2353	171
prosinac	744	2046	149
Ukupno	**9378**	**25.791**	**1876**

5. Zaključak

Procesi proizvodnje bioplina na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda u Slavonskom Brodu s prikazom proizvedene količine bioplina u 2025. godini otvaraju dobre mogućnosti iskorištavanja nastalog bioplina obradom do razine biometana.

Stlačeni biometan kroz proizvodnju i primjenu u prometu osigurava model kružnog gospodarenja energijom kroz održivo gospodarenje resursima, uporabu nastalog proizvoda i stvaranje ključnog rješenja za smanjivanje štetnih emisija i zelenu transformaciju prometa. Primijenjeni „koncept od otpada do biometana“ uz smanjivanje otpada, osiguranja niske razine emisija CO_2 i u konačnici ispunjavanje ciljeva Europske unije i Zelenog europskog plana.

Implementacijom biometana uz višestruko smanjivanje emisija CO_2 energetski postiže se efikasna zamjena za energijom fosilnog porijekla – što predstavlja direktno sudjelovanje u energetskoj tranziciji koja stvara zdravu konkurenciju daleko skupljim rješenjima današnjice. Prikazanim rješenjem proizvodnje biometana nastoji se direktno potaknuti gradove za sudjelovanjem u dekarbonizaciji i transformaciji prometa svojih sredina te potaknuti modele sufinanciranja takvih postrojenja za obradu bioplina kroz državne potpore i subvencije. Proizvodnja i primjena biometana kroz stvaranje obnovljivih izvora energije visoke vrijednosti, osigurava smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima, stvara energetsku neovisnost te sudjeluje u ugljičnoj neutralnosti.

6. Literatura

[1] Frida, Tin: Anaerobna digestija energetske kulture Panicum virgatum L. procesom bioaugmentacije, Agronomski fakultet u Zagrebu, rujan 2023., https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:204:212987), (diplomski rad); datum pristupa 31.06.2026

[2] Zoković, Ivan: Priručnik za izradu kućnog biodigestora, ZMAG-Zelena mreža aktivističkih grupa, Vukomerić, 2014., (priručnik); datum pristupa 02.07.2026

[3] Al Seadi, T., Kulišić, Biljana.: Priručnik za bioplin, EIHP, listopad 2010., Ministarstvo zaštite okoliša i zelene tranzicije, ISBN 978-87-992962-2-4 ISBN 978-953-6474-59-2, (priručnik); datum pristupa 03.07.2026

[4] https://oie-aplikacije.mzoe.hr/pregledi/PopupIzvjestaj.aspx?ReportId=17ed7352-2f8d-416b-b2fb-cec912e96428); Ministarstvo gospodarstva, Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, Zagreb, 2026; datum pristupa 31.06.2026

[5] Portal e-opg.eu, https://e-opg.eu/bioplin-proizvodnja-i-perspektiva/, e-portal, Sisak; datum pristupa 03.07.2026

[6] Portal energetika-net; https://www.energetika-net.com/obnovljivi-izvori/kapaciteti-bioplinskih-postrojenja-u-europi-sve-su-veci , datum pristupa 06.07.2026.(članak)

[7] Europska karta biometana, https://www.europeanbiogas.eu/publication/european-biomethane-map-2026/, EBA – European Biogas Association, Belgija, datum pristupa 06.07.2026 (interaktivna karta)

[8] Glavni projekt izgradnje Uređaja za pročišćavanje otpadnih voda grada Slavonskog Broda i pristupne prometnice, glavni projektant Jelena Andlar, dipl.ing.stroj., srpanj 2012.; datum pristupa 07.07.2026

[9] Ispitni izvještaj o određivanju koncentracija CH_4, CO_2, O_2, H_2 i H_2S UPOV Slavonski Brod; Laboratorij za ekotehnologije – Croteh d.o.o., Zagreb, kolovoz 2025.

[10] https://lemvigbiogas.com/BiogasHandbookPrirucnik_za_bioplinHR.pdf; datum pristupa 07.07.2026

[11] Bošnjak, Robert., Jurić, Željko, Kulišić, Biljana: Doprinos primjene koncepta „Iz otpada do biometana“ u ostvarivanju EU ciljeva, EIHP, 2013., Zagreb; datum pristupa 09.07.2026

[12] Slika 6. – vlastita izrada Td Brod-plin d.o.o., Slavonski Brod

[13] Graf 1. – Izvještaj poslovanja punionice SPP Slavonski Brod, siječanj 2026, podaci za izradu.

Utjecaj dodatka vodika prirodnom plinu na transportne mogućnosti magistralnog plinovoda
Effect of Hydrogen Blending with Natural Gas on the Transport Capacity of a Transmission Gas Pipeline

I. Korade[1], A. Barac[2*], Z. Virag[3]

[1]Strojarski odjel, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska
[2]Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište U Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska
[3] Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: abarac@unisb.hr

Sažetak
U radu se analizira utjecaj dodavanja vodika prirodnom plinu na transportne mogućnosti magistralnog plinovoda. Razmatra se izotermno stacionarno strujanje kroz cjevovod duljine 20 km i promjera 400 mm, za čisti prirodni plin te za mješavine s 10, 20 i 30 % volumnog udjela vodika te čisti vodik. Usporedba je provedena pri istoj isporučenoj energijskoj snazi plina i za četiri pogonska slučaja: nominalni opskrbni tlak i nominalna potrošnja, minimalni izlazni tlak pri nominalnoj potrošnji, maksimalni protok pri nominalnom opskrbnom tlaku i minimalnom izlaznom tlaku, te povećani opskrbni tlak uz minimalni izlazni tlak. Rezultati pokazuju da s povećanjem udjela vodika raste potreban standardni volumni protok i srednja brzina strujanja, što uzrokuje veći pad tlaka i veće transportne gubitke. Pri zadanim graničnim tlakovima energetski transportni kapacitet cjevovoda se smanjuje; za 14 bar ulaznog i 5 bar izlaznog pretlaka maksimalna isporučiva snaga smanjuje se sa 702,8 MW za prirodni plin na 644,6 MW za smjesu s 30 % vodika. Rezultati upućuju na to da transport mješavina prirodnog plina i vodika u postojećim plinovodima zahtijeva provjeru hidrauličkih uvjeta i raspoloživog transportnog kapaciteta.

Ključne riječi: Magistralni plinovod, prirodni plin, vodik, transportni kapacitet, izotermno strujanje

Abstract
This paper analyzes the influence of hydrogen addition to natural gas on the transport capabilities of a transmission gas pipeline. Isothermal steady-state flow through a 20 km long pipeline with a diameter of 400 mm is considered for pure natural gas, mixtures containing 10, 20, and 30% hydrogen by volume, and pure hydrogen. The comparison is performed at the same delivered gas energy rate and for four operating cases: nominal supply pressure and nominal consumption, minimum outlet pressure at nominal consumption, maximum flow rate at nominal supply pressure and minimum outlet pressure,

and increased supply pressure with minimum outlet pressure. The results show that increasing the hydrogen content leads to a higher required standard volumetric flow rate and higher mean flow velocity, resulting in a greater pressure drop and higher transport losses. Under the specified pressure boundary conditions, the energy transport capacity of the pipeline decreases; for an inlet gauge pressure of 14 bar and an outlet gauge pressure of 5 bar, the maximum deliverable power decreases from 702.8 MW for natural gas to 644.6 MW for a mixture containing 30% hydrogen. The results indicate that the transport of natural gas–hydrogen mixtures through existing gas pipelines requires an assessment of hydraulic conditions and the available transport capacity.

Key words: Transmission gas pipeline, natural gas, hydrogen, transport capacity, isothermal flow.

1. Uvod

Dekarbonizacija energetskog sustava zahtijeva postupno smanjenje uporabe fosilnih goriva i uvođenje energetskih nositelja s manjim ili nultim emisijama ugljikova dioksida. U tom se kontekstu vodik često razmatra kao mogući dodatak prirodnom plinu, osobito u prijelaznom razdoblju u kojem bi se postojeća plinska infrastruktura mogla koristiti za transport mješavina prirodnog plina i vodika. Takav pristup omogućio bi djelomično smanjenje emisija CO_2 bez neposredne izgradnje potpuno nove infrastrukture za transport čistog vodika.

Dodavanje vodika prirodnom plinu, međutim, mijenja termodinamička i transportna svojstva plinske smjese. Vodik ima znatno manju gustoću i manju volumensku ogrjevnu vrijednost od prirodnog plina, pa se za istu isporučenu energijsku snagu mora transportirati veći volumni protok plina. Zbog toga se mijenjaju brzina strujanja, Reynoldsov broj, faktor trenja, pad tlaka i potrebna kompresijska energija. U preglednom izvješću NREL-a istaknuto je da manja volumenska energijska gustoća vodika smanjuje transportni kapacitet pri zadanim tlakovima, a održavanje istog energijskog protoka zahtijeva povećanje protoka i kompresijske energije [1].

Dosadašnja istraživanja pokazala su da zaključci o utjecaju vodika ovise o načinu usporedbe. Ako se uspoređuju slučajevi pri istom standardnom volumnom protoku, dodatak vodika može smanjiti pad tlaka zbog manje gustoće smjese. Međutim, pri istoj isporučenoj energiji, što je za potrošače i operatore cjevovoda relevantniji kriterij, potreban je veći volumni protok, pa pad tlaka i energetski zahtjevi transporta mogu porasti. Zhang i sur. pokazali su da dodatak vodika povećava volumni protok, ali zbog manje volumenske energijske gustoće smanjuje energijski protok pri istim transportnim uvjetima [2]. Slično, NREL navodi da pri konstantnom energijskom protoku povećanje udjela vodika povećava pad tlaka do visokih udjela vodika, dok se pri fiksnom padu tlaka transportirana energija smanjuje [1].

Osim hidrauličkih učinaka, pri uvođenju vodika u postojeće plinovode važna su i pitanja pogonskih ograničenja, kompresorskih stanica, mjerenja, regulacije, sigurnosti i kompatibilnosti materijala. Kazi i sur. [3] razvili su model stacionarnog strujanja mješavina prirodnog plina i vodika u plinovodnim mrežama s kompresorima, pri čemu se tlakovi, protoci i sastav smjese određuju uz uvjete očuvanja mase i miješanja u čvorovima mreže. Takvi

modeli pokazuju da se pri analizi transporta mješavina mora istodobno pratiti hidrauličko stanje mreže i lokalni udio vodika u plinu. Pregledni rad Raj i sur. [4] dodatno naglašava da su gustoća, kompresibilnost, trenje, prijenos topline, propuštanje i interakcija s materijalom ključni elementi modeliranja transporta vodika cjevovodima. Europska vodikova infrastruktura također se razvija u smjeru postupne uporabe postojećih plinovoda, pri čemu se miješanje i naknadno izdvajanje vodika iz prirodnog plina promatra kao mogući prijelazni korak prema namjenskoj infrastrukturi za transport vodika [5].

Za procjenu mogućnosti postojećeg magistralnog plinovoda važno je stoga analizirati transport ne samo prema standardnom volumnom protoku, nego prema energijskoj snazi koja se isporučuje potrošačima. U tehničkoj praksi operatora cjevovoda ograničenja su najčešće zadana raspoloživim opskrbnim tlakom, minimalno dopuštenim tlakom na izlazu, dopuštenim brzinama strujanja i kapacitetom kompresorskih ili regulacijskih postrojenja. Zato je korisno usporediti različite udjele vodika pri istom energijskom zahtjevu potrošača, ali i odrediti maksimalnu transportnu mogućnost cjevovoda pri zadanim graničnim tlakovima.

Cilj ovog rada je analizirati transportne mogućnosti magistralnog plinovoda pri transportu prirodnog plina i mješavina prirodnog plina s 10, 20 i 30 % vodika te čistog vodika. Usporedba se provodi za istu isporučenu energijsku snagu plina, definiranu umnoškom masenog protoka i donje ogrjevne vrijednosti, te za četiri pogonska scenarija: nominalni opskrbni tlak i nominalnu potrošnju, minimalno dopušteni izlazni tlak pri nominalnoj potrošnji, maksimalni protok pri nominalnom opskrbnom tlaku i minimalnom izlaznom tlaku, te povećani opskrbni tlak uz minimalni izlazni tlak. Na taj se način procjenjuje kako udio vodika utječe na pad tlaka, potrebni opskrbni tlak, gubitke transporta i maksimalnu energijsku transportnu mogućnost cjevovoda.

2. Matematički model

Analizira se magistralni plinovod ukupne duljine L unutarnjeg promjera D i visine hidrauličke hrapavosti stijenke cjevovoda k. Pretpostavlja se izotermno strujanje plina temperature T, a za faktor kompresibilnost uzima se Z=1. Maseni protok se izražava u standardnim kubičnim metrima (m_{st}^3) pri standardnoj gustoći (na standardnom atmosferskom tlaku p_a i temperaturi plina):

$$\rho_{st} = \frac{p_a}{RT} \tag{1}$$

gdje je R posebna plinska konstanta. Veza između masenog protoka izraženog u kg/s i protoka izraženog u standardnim kubičnim metrima na sat je definirana izrazom

$$\{Q\}_{m_{st}^3/h} = \frac{\dot{m}}{\rho_{st}} \cdot 3600 \quad , \tag{2}$$

Pad tlaka u cjevovodu (od ulaznog tlaka p_1 do izlaznog p_2) u izotermnom strujanju je definiran izrazom:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{\dot{m}^2 RT}{A^2}\left[\lambda \frac{L}{D} + 2\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)\right] \tag{3}$$

gdje je $A=D^2\pi/4$, a faktor trenja λ se računa prema formuli

$$\lambda = \frac{1,325}{\ln^2\left(\frac{k}{3,7D}+\frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)}, \tag{4}$$

u kojoj je Reynoldsov broj definiran izrazom

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}, \tag{5}$$

gdje je μ viskoznost plina.
Srednja brzina plina v_{sr} u cjevovodu je definirana pri srednjem tlaku definiranom kao

$$p_{sr} = \frac{2}{3}\frac{p_1^3 - p_2^3}{p_1^2 - p_2^2}, \tag{6}$$

Prema izrazu

$$v_{sr} = \frac{\dot{m}}{\rho_{sr} A} = \frac{\dot{m} R T}{p_{sr} A}, \tag{7}$$

Snaga P koja se isporučuje potrošačima definirana je kao

$$P = \dot{m} \cdot LHV, \tag{8}$$

gdje je *LHV* donja ogrjevna vrijednost plina. U slučajevima usporedbe različitih mješavina prirodnog plina i vodika, ova će se snaga držati konstantnom (pretpostavlja se ista potreba potrošača za energijom), a maseni protoci će se usklađivati razmjerno *LHV*.
Snaga gubitaka energije (energije koja se troši za transport plina u cjevovodu) koju ćemo uspoređivati u različitim slučajevima mješavina plina smo definirali kao snagu idealne izentropske kompresije, potrebne da se izlazni tlak p_2 vrati na početni ulazni tlak p_1, a koja je definirana izrazom:

$$P_{gub} = \dot{m}\frac{\kappa R T}{\kappa - 1}\left[\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1\right], \tag{9}$$

3. Rezultati

Opisani matematički model je primijenjen na magistralni plinski cjevovod, za koji su podaci dani u Tablici 1. Proračun je izvršen za pet varijanti plina: čisti prirodni plin (udio vodika 0%), te za volumni udio vodika u prirodnom plinu od 10, 20 i 30% i čisti vodik. Termodinamička svojstva za te slučajeve su dana u Tablici 2.

Tablica 1. Ulazni podaci za proračun

Duljina cjevovoda L / (km)	20
Promjer cjevovoda D / (mm)	400
Visina hidrauličke hrapavosti k / (mm)	0,3
Temperatura plina T / (K)	288
Atmosferski tlak p_a / (Pa)	101325
Nominalni opskrbni pretlak $p_{M1,nom}$ / (bar)	14
Minimalno dopušteni pretlak na izlazu $p_{M2,min}$ / (bar)	5
Nominalni protok prirodnog plina Q_1 / (m_{st}^3/h)	60000

Tablica 2. Termodinamička svojstva mješavine prirodnog plina i vodika

Slučaj	1	2	3	4	5
Volumni udio H_2	0%	10%	20%	30%	100%
Plinska konstanta R /(J/(kg·K))	493,9	526,8	578,2	640,7	4124,0
Eksponent izentropske ekspanzije κ	1,303	1,309	1,317	1,325	1,407
Viskoznost plina $\mu \cdot 10^5$/ (Pa·s)	1,092	1,098	1,104	1,111	0,8707
Gustoća plina $\rho_{st} = p_a/(R \cdot T)$ / (kg/m^3)	0,7123	0,6678	0,6085	0,5491	0,08531
Donja ogrjevna vrijednost LHV / (MJ/kg)	46,54	47,12	47,82	48,67	119,94
Napomena: Termodinamička svojstva mješavina preuzeta su iz softvera Engineering Equation Solver (EES) [6]					

Tablica 3 prikazuje rezultate proračuna za slučaj nominalne potrošnje energije (definirane protokom od 60000 mst3/h prirodnog plina, što odgovara isporučenoj snazi od 552,5 MW) i nominalnom ulaznom pretlaku pM1=p1-pa=14 bar.

Tablica 3. Rezultati za nominalnu potrošnju pri nominalnom opskrbnom pretlaku

Volumni udio H_2	0%	10%	20%	30%	100%
$p_{M1,nom}$ / (bar)	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000
p_{M2} / (bar)	9,384	9,152	8,747	8,271	7,751
Q / (m_{st}^3/h)	60000	63209	68361	74427	194391
v_{sr} / (m/s)	12,9	13,9	15,7	18,0	49,7
$\dot{m}$ / (kg/s)	11,872	11,726	11,554	11,353	4,606
$P = \dot{m} \cdot LHV \cdot$/ (MW)	552,5	552,5	552,5	552,5	552,5
P_{gub} / (MW)	0,65	0,73	0,87	1,07	3,19
P_{gub} /P/ (%)	0,12	0,13	0,16	0,19	0,58

Izlazni tlak iz magistralnog cjevovoda u pravilu se reducira na tlak distributivne mreže. Ako se raspoloživa energija tlačne redukcije ne iskorištava u ekspanderu, ona predstavlja gubitak. Stoga je s energetskog stajališta povoljno izlazni tlak održavati što bliže minimalno dopuštenom tlaku. Tablica 4 prikazuje rezultate za slučaj nominalne potrošnje energije, uz

uvjet minimalno dopuštenog tlaka na izlazu cjevovoda, te se uspoređuju opskrbni tlakovi na ulazu cjevovoda i snage gubitaka.

Tablica 4. Rezultati za nominalnu potrošnju pri minimalnom pretlaku na izlazu

Volumni udio H_2	0%	10%	20%	30%	100%
$p_{M1,nom}$ / (bar)	11,375	11,566	11,882	12,229	12,579
p_{M2} / (bar)	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Q / (m_{st}^3/h)	60000	63209	68361	74427	194391
v_{sr} / (m/s)	22,4	23,5	25,5	27,7	72,4
$\dot{m}$ / (kg/s)	11,872	11,726	11,554	11,353	4,606
$P = \dot{m} \cdot LHV \cdot$/ (MW)	552,5	552,5	552,5	552,5	552,5
P_{gub} / (MW)	1,33	1,43	1,61	1,82	5,03
P_{gub} /P / (%)	0,24	0,26	0,29	0,33	0,91

Tablica 5 prikazuje rezultate za nominalni opskrbni pretlak uz minimalno dopušteni pretlak na izlazu, da se vidi koliki je u tom slučaju maseni protok plina, odnosno kolika je maksimalno moguća snaga koju plinovod može isporučiti (kapacitet plinovoda pri nominalnom tlaku).

Tablica 5. Rezultati za nominalni opskrbni pretlak i minimalni pretlak na izlazu

Volumni udio H_2	0%	10%	20%	30%	100%
$p_{M1,nom}$ / (bar)	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000
p_{M2} / (bar)	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Q / (m_{st}^3/h)	76317	78763	82493	86827	219554
v_{sr} / (m/s)	28,4	29,3	30,7	32,3	81,78
$\dot{m}$ / (kg/s)	15,100	14,611	13,943	13,244	5,203
$P = \dot{m} \cdot LHV \cdot$/ (MW)	702,8	688,4	666,8	644,6	624,3
P_{gub} / (MW)	2,19	2,26	2,38	2,51	6,47
P_{gub} /P / (%)	0,31	0,33	0,36	0,39	1,04

Tablica 6 prikazuje rezultate za slučaj povećanog ulaznog tlaka, uz minimalno dopušteni pretlak na izlazu cjevovoda, da se ocijeni povećanje kapaciteta plinovoda s porastom ulaznog tlaka.

Tablica 6. Rezultati za povećani opskrbni pretlak i minimalni pretlak na izlazu

Volumni udio H_2	0%	10%	20%	30%	100%
$p_{M1,nom}$ / (bar)	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
p_{M2} / (bar)	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Q / (m_{st}^3/h)	111813	115400	120871	127228	322013
v_{sr} / (m/s)	41,6	43,0	45,0	47,4	119,94
$\dot{m}$ / (kg/s)	22,123	21,407	20,430	19,407	7,631
$P = \dot{m} \cdot LHV \cdot$/ (MW)	1029,7	1008,7	977,0	944,5	915,2
P_{gub} / (MW)	4,57	4,73	4,97	5,24	13,7
P_{gub} /P / (%)	0,44	0,47	0,51	0,56	1,49

4. Diskusija

Dobiveni rezultati pokazuju da zamjena dijela prirodnog plina vodikom mijenja transportne uvjete u cjevovodu na način koji nije moguće ocijeniti samo na temelju volumnog udjela vodika. Budući da vodik ima veću ogrjevnu vrijednost od prirodnog plina, za istu isporučenu snagu trebat će manji maseni protok vodika. S druge strane, gustoća vodika puno je manja od gustoće prirodnog plina te će dodavanjem vodika u prirodni plin, volumni protok rasti. Posljedica toga je povećanje srednje brzine strujanja u cjevovodu, što izravno utječe na porast hidrauličkih gubitaka. To se jasno vidi iz usporedbe rezultata za čisti prirodni plin i za smjese s 10, 20, 30 % vodika te za čisti vodik.

U slučaju nominalne potrošnje i nominalnog opskrbnog pretlaka od 14 bar, porast udjela vodika dovodi do smanjenja izlaznog tlaka. Za čisti prirodni plin izlazni pretlak iznosi 9,384 bar, dok se za smjesu s 30 % vodika smanjuje na 8,271 bar, a za čisti vodik na 7,751 bar. Istodobno, srednja se brzina povećava s 12,9 m/s u slučaju prirodnog plina, na 18,0 m/s za 30 % udjela vodika do 49,7 m/s za čisti vodik. Procijenjena snaga gubitaka, za ta tri slučaja, raste od 0,65 MW na 1,07 MW do 3,19 MW za čisti vodik. Rezultati također pokazuju da se povećanjem udjela vodika maseni protok smanjuje zbog povećanja masene ogrjevne vrijednosti smjese (vidjeti Tablicu 2), dok se standardni volumni protok potreban za istu isporučenu energiju, povećava. Na primjer, pri nominalnoj potrošnji od 552,5 MW standardni volumni protok raste sa 60000 mst³/h za prirodni plin na 74427 mst³/h za smjesu s 30 % vodika, dok je za čisti vodik taj protok 194391 mst³/h. Ovo povećanje volumnog protoka posljedica je smanjenja gustoće smjese (vidjeti Tablicu 2), pri čemu gustoća brže opada od porasta ogrjevne vrijednosti.

Drugi analizirani slučaj, u kojem je izlazni pretlak zadan na minimalno dopuštenih 5 bar, pokazuje koliki je opskrbni tlak potreban za održavanje iste potrošnje energije. Rezultati pokazuju da s povećanjem udjela vodika raste potrebni ulazni pretlak s 11,375 bar za čisti prirodni plin na 12,229 bar za smjesu s 30 % vodika do 12,579 bar za čisti vodik. Iako je porast tlaka za čisti vodik u odnosu na smjesu s 30 % vodika relativno mali, snaga gubitaka se povećala 2,8 puta što je posljedica povećanja brzine 2,6 puta (s 27,7 na 72,4 m/s). Takav rezultat potvrđuje da dodatak vodika smanjuje hidraulički povoljne transportne uvjete jer je

za istu isporučenu energiju potrebna veća razlika tlaka odnosno veća snaga za povrat od izlaznog tlaka p_2 na ulazni tlak p_1.

Posebno je važan rezultat dobiven za slučaj kada su ulazni i izlazni tlakovi zadani, tj. kada se promatra stvarni transportni kapacitet postojećeg cjevovoda. Pri nominalnom opskrbnom pretlaku od 14 bar i minimalnom izlaznom pretlaku od 5 bar maksimalna isporučiva snaga smanjuje se sa 702,8 MW za čisti prirodni plin na 644,6 MW za smjesu s 30 % vodika, dok za čisti vodik maksimalno isporučiva snaga iznosi 624,3 MW. Smanjenje transportnih mogućnosti može se objasniti činjenicom da se dodavanjem vodika povećava potrebni standardni volumni protok za istu energijsku snagu, dok mala gustoća smjese uzrokuje veće brzine strujanja i veće hidrauličke gubitke. Iako vodik ima veću masenu ogrjevnu vrijednost, njegova mala volumenska energijska gustoća ograničava energijski kapacitet cjevovoda pri zadanim graničnim tlakovima.

Sličan trend dobiven je i pri povećanom opskrbnom pretlaku od 20 bar. Očekivano, povećanje ulaznog tlaka znatno povećava transportnu mogućnost cjevovoda u svim analiziranim slučajevima. Međutim, relativni utjecaj vodika ostaje isti: maksimalno isporučiva snaga smanjuje se s 1029,7 MW za čisti prirodni plin na 944,5 MW za smjesu s 30 % vodika, dok za čisti vodik iznosi 915,2 MW. To pokazuje da se povećanjem opskrbnog tlaka može djelomično kompenzirati smanjenje transportnog kapaciteta, ali se ne uklanja osnovni fizikalni razlog smanjenja kapaciteta pri većem udjelu vodika.

Treba naglasiti da su proračuni provedeni uz nekoliko pojednostavnjujućih pretpostavki. Pretpostavljeno je izotermno stacionarno strujanje, faktor kompresibilnosti je uzet jednak jedan, a svojstva smjese uzeta su kao konstantna. Takav pristup je prikladan za usporednu analizu i procjenu relativnih učinaka dodavanja vodika, ali za detaljan projektni proračun bilo bi potrebno uključiti realni faktor kompresibilnosti, promjenu temperature i eventualna ograničenja vezana uz dopuštene brzine strujanja, mjernu opremu, regulacijske stanice i materijalnu kompatibilnost cjevovoda s vodikom.

Unatoč tim pojednostavljenjima, rezultati jasno pokazuju osnovni trend: dodavanje vodika prirodnom plinu povećava zahtjeve na transportni sustav. Za istu isporučenu energijsku snagu potreban je veći volumni protok i veća brzina strujanja, što uzrokuje relativno veće gubitke. Ako su tlakovi na ulazu i izlazu ograničeni, tada se s porastom udjela vodika smanjuje maksimalna energijska transportna mogućnost postojećeg cjevovoda.

Dodatno treba istaknuti da izračunata snaga gubitaka ne predstavlja stvarnu pogonsku potrošnju konkretnog kompresorskog ili regulacijskog postrojenja, nego teorijsku usporednu vrijednost definiranu kao snaga idealne izentropske kompresije potrebne za povrat plina s izlaznog tlaka p_2 na ulazni tlak p_1. Stoga se vrijednosti snage gubitaka u ovom radu koriste prvenstveno kao pokazatelj relativne promjene energetskih zahtjeva transporta pri različitim udjelima vodika. Također, rezultati dobiveni za čisti vodik predstavljaju usporedni granični slučaj primijenjenog modela. Zbog male gustoće vodika u tim su slučajevima dobivene vrlo velike srednje brzine strujanja, koje bi u stvarnoj primjeni zahtijevale dodatnu provjeru dopuštenih pogonskih uvjeta, uključujući ograničenja brzine strujanja, pad tlaka, buku, vibracije, mjernu i regulacijsku opremu te materijalnu kompatibilnost cjevovoda.

5. Zaključci

Na temelju provedene analize mogu se donijeti sljedeći zaključci:

1) Pri istoj isporučenoj energijskoj snazi dodatak vodika povećava potrebni standardni volumni protok i srednju brzinu strujanja u cjevovodu.
2) Povećanje udjela vodika dovodi do većeg pada tlaka, odnosno do većih gubitaka energije pri transportu plina.
3) Ako se zadrže isti ulazni i izlazni tlakovi, maksimalna isporučiva energijska snaga cjevovoda smanjuje se s povećanjem udjela vodika.
4) Povećanjem opskrbnog tlaka moguće je povećati transportni kapacitet cjevovoda, ali se pritom zadržava trend smanjenja kapaciteta s povećanjem udjela vodika.

Iako se s porastom udjela vodika standardni volumni protok povećava, to ne znači povećanje transportirane energije; naprotiv, pri zadanim granicama tlaka energetski kapacitet cjevovoda se smanjuje.

6. Literatura

[1] Topolski, K., Reznicek, E. P., Erdener, B. C., San Marchi, C. W., Ronevich, J. A., Fring, L., Simmons, K., Fernandez, O. J., Hodge, B.-M., Chung, M. Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5400-81704, 2022.

[2] Zhang, H., Li, J., Su, Y., Wang, P., Yu, B. “Effects of Hydrogen Blending on Hydraulic and Thermal Characteristics of Natural Gas Pipeline and Pipe Network.” Oil & Gas Science and Technology – Revue d’IFP Energies nouvelles, 76, 70, 2021.

[3] Kazi, S. R., Sundar, K., Srinivasan, S., Zlotnik, A. “Modeling and Optimization of Steady Flow of Natural Gas and Hydrogen Mixtures in Pipeline Networks.” arXiv:2212.00961, 2022.

[4] Raj, A., Larsson, I. A. S., Ljung, A.-L., Forslund, T., Andersson, R., Sundström, J., Lundström, T. S. “Evaluating Hydrogen Gas Transport in Pipelines: Current State of Numerical and Experimental Methodologies.” International Journal of Hydrogen Energy, 67, 136–149, 2024.

[5] European Hydrogen Backbone. European Hydrogen Backbone: A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries. April 2022.

[6] Klein, S. A., EES - Engineering Equation Solver, F-Chart Software, Version: 12.137. 2025. Available: https://fchartsoftware.com/ees/

Prilozi za povijest energetike Slavonije i Baranje (2)

Doprinosi Zdravka Fadljevića razvoju plinofikacije slavonske regije

Contributions of Zdravko Fadljević *to the development of gasification in the slavonia region*

M. Ivanović*
PANON - institut za strateške studije, Osijek, Hrvatska

Autor za korespodenciju: E-mail: panon.institut@gmail.com

Sažetak
U seriji radova 'Prilozi za povijest energetike Slavonije i Baranje' na ovom simpoziju obrađuju se početci i razvoj energetskih kapaciteta na području regije Slavonije i Baranje. U ovom se radu obrađuju početci plinofikacije i doprinosi ekonomiste Zdravka Fadljevića (1950 - 2006), direktora OOUR-a „Distribucija plina“ (poduzeća „Elektroslavonija“ Osijek), energetskom razvoju regije i procesu plinofikacije u Slavoniji. U zaključku se ukazuje na značaj doprinosa Zdravka Fadljevića za provedbu procesa plinofikacije regije.

Ključne riječi: Zdravko Fadljević, Povijest energetike, Prirodni plin, Plinofikacija, Slavonija

Abstract
In the series of papers 'Contributions to the history of energy in Slavonia and Baranja', this symposium examines the beginnings and development of energy capacities in the region of Slavonia and Baranja. This paper examines the beginnings of gasification and the contributions of economist Zdravko Fadljević (1950 - 2006), director of the OOUR "Gas Distribution" (the company of "Elektroslavonija" Osijek), to the energy development of the region and the gasification process in Slavonia. The conclusion points out the significance of Zdravko Fadljević's contribution to the implementation of the gasification process in the region.

Key words: Gasification, History of energy, Natural gas, Slavonia, Zdravko Fadljević

1. Složeni procesi plinofikacije slavonske regije

Izgradnja plinskog sustava je složen tehno-ekonomski proces koji je karakterističan za sve infrastrukturne instalacije i objekte. Tako su i izgradnju plinskog sustava i plinofikaciju Slavonije pratili brojni organizacijski, financijski, kadrovski i tehnički problemi - što je trebalo simultano rješavati u nepovoljnim privrednim uvjetima - kakvi su bili krajem 70-tih i početkom 80-tih godina XX. stoljeća u Hrvatskoj.

Program „Plinofikacije Zajednice općina Osijek (14 tadašnjih općina – slavon-sko-baranjska regija) bio je načinjen krajem 1978. g. a potom su izrađivane studije i izvedbeni projekti za općine i naselja. Posebne probleme su predstavljali neinformiranost i nedovoljna tehnička pripremljenost potrošača industriji, komunalnoj potrošnji (javni sektor, škole, bolnice itd.) i kućanstvima. Tehničkih stručnjaka za projektiranje, izgradnju i korištenje plina nije bilo dovoljno što je nadoknađeno maksimalnim naporima stručnih timova u „Elektroslavoniji“ i Ekonomsko-tehničkom zavodu Osijek (ETZ). Investicije u infrastrukturne objekte – kakvi su i elementi plinskog sustava - imaju dugo vrijeme povrata uloženih financijskih sredstava kojih, pak, nije bilo dovoljno, a poseban je problem predstavljala i inflacija - koja je sve procese u ovim investicijama učinila još složenijim. No, sve su poteškoće bile prevladavane i proces plinofikacije regije se počeo realizirati – ne planiranom dinamikom, ali ipak se provodio [1].

Jedan od stručnjaka koji je dao značajne doprinose plinofikaciji slavon-ske regije je i ekonomist Zdravko Fad-ljević, višegodišnji direktor tvrtke za distribuciju plina iz Osijeka.

IZ OOUR DISTRIBUCIJA PLINA

Teško u snabdijevanju prirodnim plinom

Ove godine osigurana je tek jedna trećina potrebnih količina prirodnog plina, što će stvoriti teškoće u snabdijevanju potrošača

U prethodne dvije godine u periodu zime studeni — ožujak, isporuka plina potrošačima vršena je uz velika ograničenja u cijeloj SR Hrvatskoj. Razlog tome su nedovoljne količine prirodnog plina koje se proizvode u zemlji i uvoze, u odnosu na narasle potrebe nakon intenzivne plinifikacije u SR Hrvatskoj.

INA-naftaplin izvršila je raspodjelu raspoloživih količina plina. Baza za određivanje bila je ostvarena potrošnja 1980. godine, što je za područje »Elektroslavonije« izuzetno nepovoljno, obzirom na rast potreba potrošača koji je veći od prosjeka republike.

Prema raspodjeli na bazi 1980. godine i u odnosu na potrebe potrošača, ograničenja su iznosila od 65 — 75 posto, što znači, da su u kritičnom razdoblju pojedini potrošači bili bez plina od 10 — 90 dana. Jedino je RO »OPEKA« Sarvaš stajala s proizvodnjom 40 dana, jer ne posjeduje alternativne instalacije. Obje toplane u Osijeku radile su samo izuzetno na plin preko državnih praznika i poneki vikend, kada je potrošnja ostalih potrošača zbog povoljnih klimatskih prilika bila manja.

Akceptirajući teškoće u opskrbi prirodnim plinom proteklih sezona grijanja i znajući da je vegetacijski period poljoprivrednih kultura (kukuruz) pomaknut za skoro 30 dana, a uz to da je vlažnost zrna izuzetno visoka — 35 — 45 posto, OOUR Distribucija plina je koncem rujna pokrenula inicijativu preko privredne komore SRH, da se osiguraju dovoljne količine plina za sušare žitarica i potrebe domaćinstava. U tom smislu na sastanku Općeg udruženja komunalno stambene privrede Hrvatske održanog u Zagrebu 17. listopada doneseni su i odgovarajući zaključci.

Međutim, kako je INA-naftaplin stavila na raspolaganje »Elektroslavoniji« 10.100 m³/h plina a potrebe su 37.000 m³/h gdje samo sušare troše 10.780 m³ plina na sat te domaćinstva 4.900 m³/h, zatražena je intervencija kod INA-naftaplina od nadležnih republičkih organa, Zajednice općina Osijek i Privredne ko-

naftaplina, znatno bolju situaciju u opskrbi potrošača prirodnim plinom možemo očekivati tek nakon ulaska u pogon plinskog polja »MOLVE 2« i nekih drugih manjih izvorišta plina. Ali to se može očekivati tek od jeseni 1985. godine, što znači tek za sezonu 1985/86. Tada bi moglo doći i do uravnoteženja moguće proizvodnje i nabave plina za potrebe potrošača.

ZDRAVKO FADLJEVIĆ

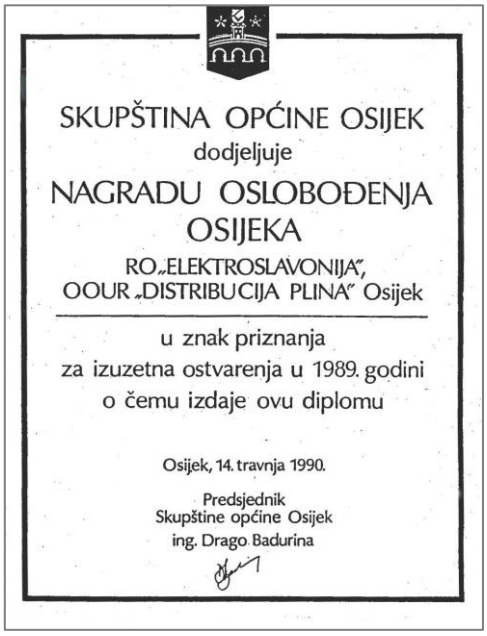
Slika 1. Članak Zdravka Fadljevića u listu „Elektroslavonija“ (1981.) [2]

2. **Zdravko Fadljević** (1950 - 2006) **- životopis**

Zdravko Fadljević je rođen je 1950. godine u Osijeku, gdje je završio osnovnu i sred-nju školu te diplomirao na Ekonomskom fakultetu. Godine 1973. zaposlio se u poduzeću „Poljoprivredna služba“ IPK Osijek kao šef raču-novodstva. Godine 1976. godine prelazi, u „Elektro-slavoniju" Osijek gdje tri godine radi kao ekonomist za investicije u razvoj plinskog sustava. Od 1980. do 1981. godine bio je rukovoditelj prodaje u OOUR-u „Termo-elektrana-toplana“ (poduzeću u sastavu „Elektrosla-vonija“), a od srpnja 1981. do 1989. godine bio je direktor OOUR-a „Distribucija plina“ („Elektroslavonija"). U organizacijskim promjenama ponovo rukovodi tvrtkom koja se sada zove Pogon distribucije plina u razdoblju od 1991. do 2002. godine. Nakon isteka mandata u razdoblju od 2002. do 2006. godine na radi na mjestu rukovoditelja Ureda direktora.

Slika 2. Zdravko Fadljević [2]

Svojim stručnim i predanim radom u početnim godinama pravnog osamostaljenja poduzeća „Distribucija plina“ Fadljević je pridonio razvoju plinofikacije u više općine slavonske regije te pridonio da poduzeće dobije niz društvenih priznanja, među kojima i Nagradu Oslobođenja Osijeka (1989. godine).



SKUPŠTINA OPĆINE OSIJEK
dodjeljuje
NAGRADU OSLOBOĐENJA OSIJEKA
RO „ELEKTROSLAVONIJA“,
OOUR „DISTRIBUCIJA PLINA“ Osijek

u znak priznanja
za izuzetna ostvarenja u 1989. godini
o čemu izdaje ovu diplomu

Osijek, 14. travnja 1990.

Predsjednik
Skupštine općine Osijek
ing. Drago Badurina

Slika 3. Priznanje grada Osijeka poduzeću „Distribucije plina“ [2]

OPĆINA
STRIZIVOJNA

Zahvalnica
prigodom 10-te god. Općine i 75-te god. Župe

Zdravku Fadljeviću

za doprinos duhovnom, kulturnom i materijalnom razvoju i napretku Općine Strizivojna

U Strizivojni, 27. lipnja 2003.

Načelnik Općine Strizivojna
Mijo Raguž, dipl. ing. str.

Slika 4. Priznanje općine Strizivojna Zdravku Fadljeviću [2]

U vrijeme agresije na Republiku Hrvatsku (1991.-1995.) Zdravko Fadljević značajno je pridonosio rješavanju razvojnih i poslovnih pitanja poduzeća „Distribucija plina“ u vrlo nepovoljnim uvjetima.

U časopisima i zbornicima stručnih skupo-va Fadljević je objavio više stručnih radova. Nesretnim slučajem smrtno je stradao u prometnoj nesreći 29. rujna 2006. godine.

Osim dobrih poslovnih postignuća na pod-ručju slavonske regije, Fadljević je kao zapaženi stručnjak sudjelovao u stručnim aktivnostima na nacionalnoj razini te je 1993. g. bio među utemeljiteljima Hrvatske stručne udruge za plin, a 2000-tih bio je i na funkciji dopredsjednika Upravnog odbora ovog najvećeg stručnog udruženja za prirodni plin u Republici Hrvatskoj.

IN MEMORIAM

Zdravko Fadljević

UMRO JE gosp. **ZDRAVKO FADLJEVIĆ, dipl.oec.**
Član i dopredsjednik Hrvatske stručne udruge za plin.
U jutarnjim satima u petak 29. rujna 2006., u teškoj prometnoj nesreći na osječkoj obilaznici, poginuo je naš dugogodišnji član, suradnik i dopredsjednik Hrvatske stručne udruge za plin, stručnjak i dragi prijatelj, gospodin Zdravko Fadljević.
Od samih početaka u razvoju prirodnog plina kao energenta u Slavoniji, kojeg danas koriste deseci tisuća potrošača u toj regiji, Zdravko je bio prisutan, dajući svoj veliki doprinos tom razvoju, kao vrstan stručnjak i rukovoditelj u tvrtki Elektroslavonija, a danas HEP-Plin d.o.o. - za distribuciju plina.
Zdravko Fadljević je rođen je 1950. godine u Osijeku, gdje je i diplomirao na Ekonomskom fakultetu.
Godine 1973. se zaposlio u Poljoprivrednoj službi IPK Osijek, gdje radi na mjestu šefa računovodstva do 1976. godine, kada prelazi u osječku „Elektroslavoniju“, i tri godine radi kao ekonomist za investicije u distribuciji plina.
Od 1980. do 1981. godine je rukovoditelj prodaje u Toplani (HEP DP „Elektroslavonija „ Osijek), a od srpnja 1981. do 1989. godine je direktor OOUR-a Distribucija plina u osječkoj „Elektroslavoniji“. Radni vijek kontinuirano veže uz „Elektroslavoniju“ i svoju stručnost potvrđuje na rukovodećim mjestima.
Od 1991. do 2002. godine rukovodi Pogonom distribucije plina. Kao radišni menadžer i vrsni stručnjak za plinarstvo, gosp. Zdravko Fadljević je direktor tvrtke HEP - Plin Osijek od 2002. do 2006. godine. Nakon isteka mandata, do nesretnog životnog trenutka radio je na mjestu rukovoditelja Ureda direktora.
1993. godine , kao rukovoditelj distribucije plina u Osijeku, drugoj po veličini u Hrvatskoj, dao je snažnu podršku osnivanju Hrvatske stručne udruge za plin-HSUP, te od tada do svoje tragične smrti bio stalno prisutan u njezinom radu. U tom trenutku u Udruzi je bio na funkciji dopredsjednika Upravnog odbora.
Gospodin Zdravko Fadljević bio je u HSUP-u uvijek rado viđen suradnik, a njegov optimizam i radna energija uvijek su bili od pomoći pri obavljanju složenih zadataka. Njegova tragična smrt izazvala je u Udruzi veliku žalost i nenadoknadiv gubitak.
Stoga još jednom dragom Zdravku u ime svih članova HSUP-a upućujemo posljednji pozdrav i zahvalu.
HSUP

Slika 5. In memoriam Zdravku Fadljeviću u časopisu „Plin“ [1]

U nastavku se daje pregled važnijih kretanja i podataka koji ilustriraju procese plinofikacije na podruju regije, a u kojima je značajan doprinos svojim djelovanjem i radom dao ekonomist Zdravko Fadljević.

3. Izgradnja magistralnih plinovoda i distribucijske mreže

Magistralne plinovode na području slavonske regije financirala je i izgradila „INA-Naftaplin“ (Zagreb), a izgradnju distribucijskih plinovode financirala je lokalna samouprava. Tijek plinofikacije Slavonije do 1991. godine opisuju podaci o izgradnji plinovodne mreže, broju mjerno-redukcijskih stanica (MRS) i broja potrošača te potrošnje prirodnog plina; tab 1 – 2 i slika 6.

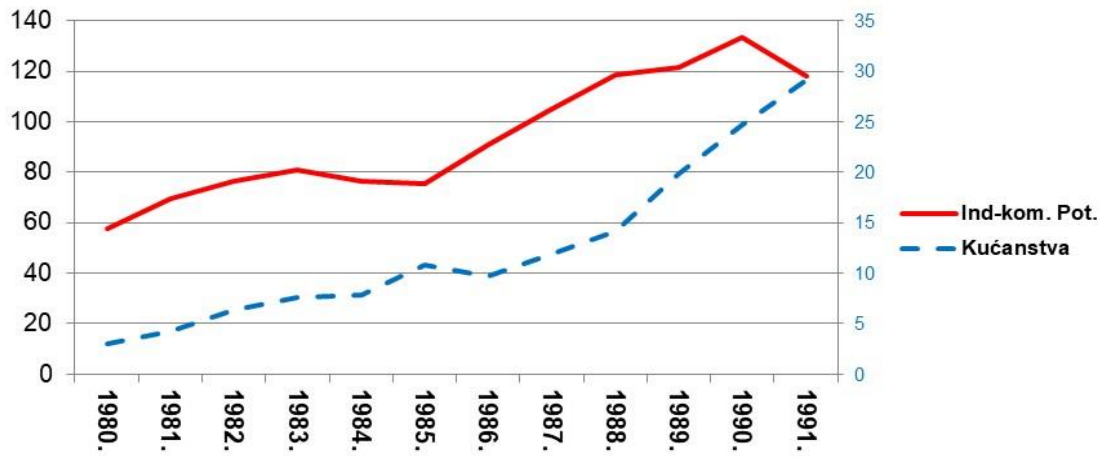
Priključivanje novih potrošača ovisilo je o: količinama raspoloživog prirodnog plina, povezanosti lokalne potrošnje s magistralnom mrežom, količinama potrošnje plina te izgrađenosti distribucijske mreže. Od ukupno 14 općina Istočne Hrvatske u 1991. plin se koristi na području 6 općina, a neplinoficirane općine su: Beli Manastir, Đakovo, Nova Gradiška, Vukovar i Županja. Tadašnje općine Sl. Brod, Orahoivica i Vinkovci odabrale su druge (svoje lokalne) distributere [5] [6].

Tablica 1. Distribucijski plinovodi i MRS-e na području Slavonije [4]

Godine	1979.	1981.	1983.	1985.	1987.	1989.	1991.
Dist.plinovodi (km)	34,8	86,2	136	168	193	372	444
MRS-e (kom)	6	13	15	23	26	32	38

.**Tablica 2**. Broj potrošača prirodnog plina putem „Distribucije plina“ na području šest slavonskih općina od 1980. do 1991. godine [4]

Rb	Općina	1980.	1981.	1983.	1985.	1987.	1989.	1991.
1.	**Osijek** (uk.)	**1.256**	**1.560**	**2.777**	**3.426**	**4.286**	**10.139**	**13.167**
a	Velepotrošači	2	2	2	2	2	3	3
b	Ind-kom.potrošnja	14	24	50	91	110	140	207
c	Kućanstva	1.240	1.534	2.725	3.333	4.174	9.996	12.977
2.	**D. Miholjac**	**659**	**826**	**1.053**	**1.174**	**1.301**	**1.446**	**1.682**
b	Ind-kom. potrošnja	48	65	84	96	104	116	128
c	Kućanstva	611	761	969	1.078	1.197	1.320	1.554
3.	**Našice**	**265**	**416**	**768**	**921**	**1.123**	**1.462**	**1.997**
b	Ind-kom. potrošnja	30	51	97	117	130	153	174
c	Kućanstva	235	365	671	804	993	1.309	1.823
4.	**P. Slatina**	6	17	143	230	372	672	1.085
b	Ind-kom. potrošnja	5	16	45	66	81	102	141
c	Kućanstva	1	1	98	164	291	570	944
5	**Sl. Požega**	**-**	**1**	**75**	**246**	**512**	**863**	**1.122**
b	Ind-kom. potrošnja	-	1	17	54	71	91	119
c	Kućanstva	-	-	58	192	441	772	1.003
6.	**Valpovo**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**4**	**59**
b	Ind-kom. potrošnja	-	-	-	-	-	4	10
c	Kućanstva	-	-	-	-	-		49
7.	**Ukupno**	**2.186**	**2.820**	**4.816**	**5.997**	**7.594**	**14.586**	**19.112**
a	Velepotrošači	2	2	2	2	2	3	3
b	Ind-kom.	97	157	293	424	496	606	779
c	Kućanstva	2.087	2.661	4.521	5.571	7.096	13.967	18.350



Slika 6. Potrošnja prirodnog plina u distribuciji „Elektroslavonije“ na području slavonske regije (10^6 m^3) [4]

Nakon Domovinskog rata HEP Plin nastavlja s plinofikacijom više naselja u na području Đakova, Valpova. Tablica 5. prikazuje kretanja na području ovih općina.

Tablica 3. Broj potrošača prirodnog plina u Đakovu i Valpovu [4]

Rb	Sektor	1996.	1997.	1998.	1999.	2000.
1.	**Đakovo**					
a	Kućanstva	1.700	2.430	2.809	3.223	3.453
b	Ind-kom. pot.	55	97	141	169	191
c	Plinovodi (km)	97	153	261	233	233
2.	**Valpovo**					
a	Kućanstva	1.578	1.591		1.630	1.715
b	Ind.-kom.pot.	77	112		130	131
c	Plinovodi (km)	115	115		115	115

3.1. Porast broja zaposlenih

Brzi razvoj plinofikacije u regiji utjecao je i na porast broja zaposlenih kao i na poboljšanje kvalifikacijske strukture u poduzeću.; tab 4 i 5.:

Tablica 4. Broj zaposlenih u „Distribuciji plina“ Osijek od 1975. do 1990. godine [4]

Godina	Broj zaposlenih	Godina	Broj zaposlenih
1981.	49	1991.	94
1983.	60	1996.	119
1988.	81	1998.	118
1990.	103	2000.	119

Tablica 5. Zaposleni u „Distribuciji plina“ Osijek - prema stručnoj spremi [4]

Str. sprema	1980.	1981.	1990.	2000.
mr. sc.	-	1	1	1
VSS	5	6	10	18
VŠS	1	2	6	10
SSS	14	28	53	49
NSS	-	-	-	2
VKV	2	2	2	1
KV	7	8	26	36
NKV	1	2	5	2
Ukupno	30	49	103	119

1. XI 1985. »ELEKTRO

NA TEMELJU NATJEČAJA I ODLUKE RS

IZABRAN DIREKTOR OOUR DISTRIBUCIJE PLINA

Ova odgovorna dužnost ponovo je povjerena Zdravku Fadljeviću

NAKON ISTEKA ČETVEROGODIŠNJEG MANDATA DUŽNOSTI DIREKTORA OOUR DISTRIBUCIJE PLINA, RADNIČKI SAVJET JE RASPISAO JAVNI NATJEČAJ ZA OBAVLJANJE OVE FUNKCIJE.

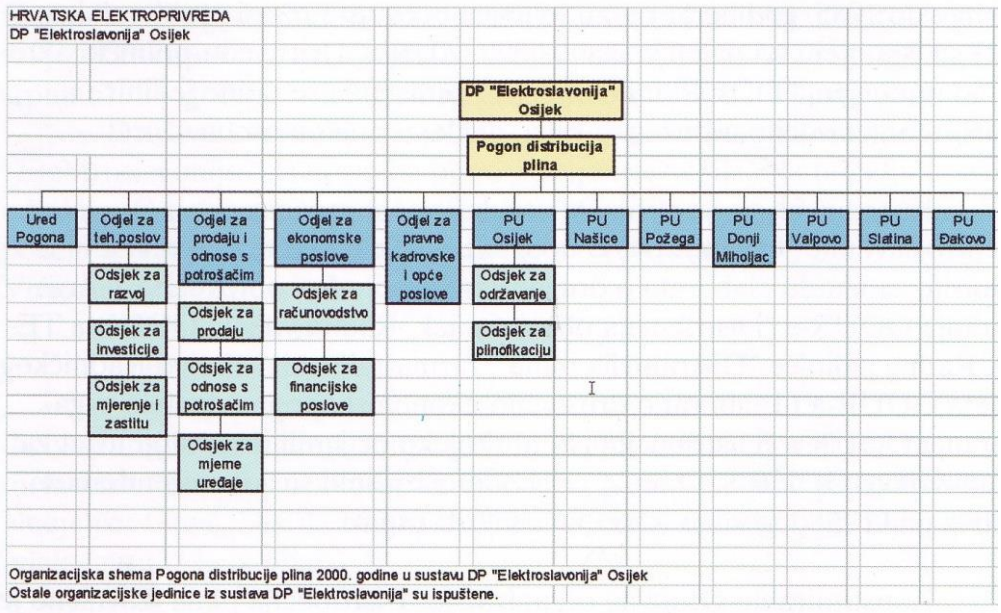
Natječajna komisija koju je imenovao radnički savjet razmotrila je sve prispjele zahtjeve i predložila Radničkom savjetu, da se za direktora OOUR izabere drug Zdravko Fadljević. Ovaj prijedlog je usvojen, a Radnički savjet je na sjednici 11. IX 1985. godine donio konačnu odluku o imenovanju.

Drug Zdravko Fadljević nalazi se u »Elektroslavoniji« od 1975. godine u koje je vrijeme obavljao više odgovornih dužnosti na poslovima ekonomiste u RZ Zajedničke službe i OOUR TE-TO. Kako je u poslovima ispoljio sve vrijednosti dobrog organizatora i stručnjaka, imenovan je 1981. godine za direktora OOUR Distribucija plina, kada je osnovana ova OOUR.

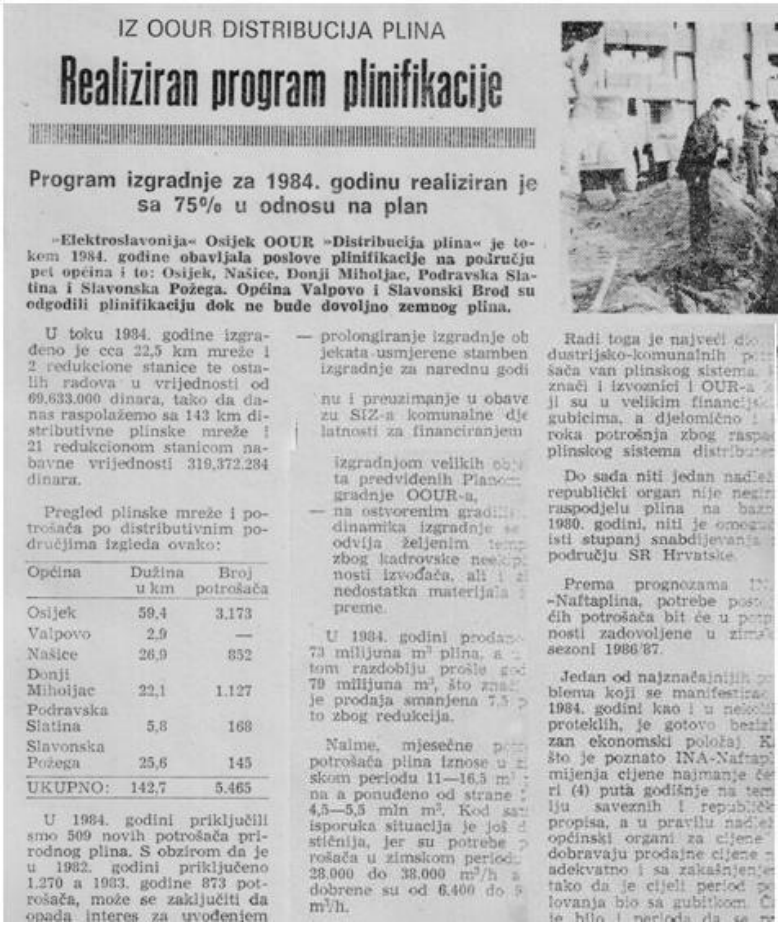
U svim prethodnim raspravama u vrijeme rasprava o potencijalnim kandidatima za ovu odgovornu dužnost rečeno je, da izbor Zdravka Fadljevića na dužnost direktora predstavlja najbolje rješenje. Naime, u prethodnom mandatu, pokazao je sve osobine dobrog stručnjaka, organizatora i rukovodioca, pa mu stoga treba povjeriti ovu dužnost i za naredni mandat. U svom radu zadnjih četiri godine dao je značajan doprinos u ublažavanju složene situacije privređivanja i stekao povjerenje sredine u kojoj radi i djeluje. — Đ.

Slika 7. Članak u listu „Elektroslavonija“ [2]

Dinamičan i kompleksan proces plinofikacije slavonske regije utjecao je i na strukturu organizacije poduzeća – koja se prilagođavala poslovnoj problematici. Na sl. 8 prikazana je organizacijska struktura „Distribucija plina“ do 2000. godine.



Slika 8. Organizacijska struktura Pogona „Distribucija plina“ Osijek [4]



IZ OOUR DISTRIBUCIJA PLINA

Realiziran program plinifikacije

Program izgradnje za 1984. godinu realiziran je sa 75% u odnosu na plan

»Elektroslavonija« Osijek OOUR »Distribucija plina« je tokom 1984. godine obavljala poslove plinifikacije na području pet općina i to: Osijek, Našice, Donji Miholjac, Podravska Slatina i Slavonska Požega. Općina Valpovo i Slavonski Brod su odgodili plinifikaciju dok ne bude dovoljno zemnog plina.

U toku 1984. godine izgrađeno je cca 22,5 km mreže i 2 redukcione stanice te ostalih radova u vrijednosti od 69.633.000 dinara, tako da danas raspolažemo sa 143 km distributivne plinske mreže i 21 redukcionom stanicom nabavne vrijednosti 319.372.284 dinara.

Pregled plinske mreže i potrošača po distributivnim područjima izgleda ovako:

Općina	Dužina u km	Broj potrošača
Osijek	59,4	3.173
Valpovo	2,9	—
Našice	26,9	852
Donji Miholjac	22,1	1.127
Podravska Slatina	5,8	168
Slavonska Požega	25,6	145
UKUPNO:	142,7	5.465

U 1984. godini priključili smo 509 novih potrošača prirodnog plina. S obzirom da je u 1982. godini priključeno 1.270 a 1983. godine 873 potrošača, može se zaključiti da opada interes za uvođenjem

— prolongiranje izgradnje objekata usmjerene stamben izgradnje za narednu godi

nu i preuzimanje u obave zu SIZ-a komunalne dje latnosti za financiranjem

izgradnjom velikih obj ta predviđenih Plano gradnje OOUR-a,

— na ostvorenim gradil dinamika izgradnje se odvija željenim tem zbog kadrovske nesig nosti izvođača, ali i z nedostatka materijala i preme.

U 1984. godini prodan 73 milijuna m³ plina, a u tom razdoblju prošle god 79 milijuna m³, što znači je prodaja smanjena 7,5 % to zbog redukcija.

Nalme, mjesečne potrošača plina iznose u z skom periodu 11—16,5 m³ na a ponuđeno od strane 4,5—5,5 mln m³. Kod sa isporuka situacija je još d stičnija, jer su potrebe rošača u zimskom period 28.000 do 38.000 m³/h a dobrene su od 6.400 do 9 m³/h.

Radi toga je najveći dio dustrijsko-komunalnih potr šača van plinskog sistema. I znači i izvoznici i OUR-a ji su u velikim financija gubicima, a djelomično i roka potrošnja zbog raspa plinskog sistema distribu

Do sada niti jedan nadle republički organ nije negir raspodjelu plina na baz 1980. godini, niti je omogu isti stupanj snabdijevanja području SR Hrvatske.

Prema prognozama -Naftaplina, potrebe pos ćih potrošača bit će u potp nosti zadovoljene u zim sezoni 1986/87.

Jedan od najznačajnijih p blema koji se manifestira 1984. godini kao i u nekoli proteklih, je gotovo bezizl zan ekonomski položaj. K što je poznato INA-Naftap mijenja cijene najmanje če ri (4) puta godišnje na tem lju saveznih i republičk propisa, a u pravilu nadle općinski organi za cijene dobravaju prodajne cijene adekvatno i sa zakašnjenje tako da je cijeli period p lovanja bio sa gubitkom. Č je bilo i nešto da se

Slika 9. Članak u listu „Elektroslavonija“ [2]

razgovor s povodom

ZVONKO FADLJEVIĆ, DIREKTOR HEP PLIN d.o.o.

PREMA VELIČINI, DRUGI KONCESIONAR U HRVATSKOJ

TRADICIONALNI susret davatelja koncesija i koncesionara za distribuciju prirodnog plina, održan je i ove godine u predbožičnom raspoloženju. Bila je to prigoda da se, na skupu u Osijeku, sastane trideset predstavnika lokalne samouprave iz tri slavonske županije: Slavonsko-baranjske, Požeško-slavonske i Virovitičko-podravske u kojima je HEP-Plin d.o.o. Osijek, odabran za distributera plina, odnosno koncesionara. Kako se ovaj skup na kraju svake godine organizira u cilju razmjene iskustava, razgovora o poboljšanju zajedničkog poslovanja i prijedloga za proširenjem davatelja koncesija posredstvom natječaja, direktor HEP Plina Zdravko Fadljević iznio je nekoliko zanimljivosti zbog kojih smo se odlučili za razgovor. Stoga, objavljujemo zanimljivosti o poslovanju ove tvrtke u sastavu HEP-a, koje su većini naših radnika nepoznate.

Prema Zakonu o komunalnom gospodarstvu, koncesije za opskrbu plinom do početka 2002. godine davale su lokalne samouprave, konkretnije općinska središta, dok prema novim zakonskim propisima, odnosno Zakonu o tržištu plina, to mogu činiti samo regionalne uprave, u našem slučaju županije. Tako je HEP-Plin d.o.o. u proteklih šest godina potpisao ugovore s 22 davatelja koncesija, od kojih su dva na rok od pet i dva na rok od deset godina, a najveći broj na maksimalno mogući rok od 30 godina. Upravo krajem ove godine, broj davatelja koncesija s kojima je naša tvrtka potpisala ugovor, povećao se za još dva općinska središta: Strizivojnu, Jakšić i grad Slatinu, rekao je Z. Fadljević.

Danas nam na već plinificiranom području preostaje riješiti do kraja grad Našice i općinu Feričanci u Osječko-baranjskoj županiji, u Požeško-slavonskoj općine Velika i Kaptol u kojim za sada plin iz mreže susjednih općina koriste samo potrošači rubnih dijelova. Dakako, preostaje nam do kraja riješiti i grad Požegu koji je plinificiran na 90 posto svog teritorija. Ovdje želim još naglasiti da je od 22 općinska središta - davatelja koncesija, koja su povjerenje iskazala našoj tvrtki, u njih 16 plinifikacija okončana u 100 postotnom opsegu, a u ostalim općinama smo na razini 80 postotnog okončanja posla. Naš posao podrazumijeva izgradnju plinske mreže, no ne i kućne priključke što financiraju sami potrošači. Vjerojatno zbog toga u tim mjestima imamo malo manji broj potrošača od kapaciteta plinske mreže.

U Virovitičko-podravskoj županiji tek smo "probili led". Za sada tamo kao koncesionar pokrivamo samo grad Slatinu te općine Čađavica i Nova Bukovica. No, nadam se da je to tek početak našeg prodora na to područje i da će nas mnogi uskoro prepoznati kao iznimno ozbiljnog i pouzdanog partnera.

HEP PLIN OPSKRBLJUJE PRIBLIŽNO 50 TISUĆA POTROŠAČA

Nama najbliža, Vukovarsko-srijemska županija, za sada je nedostupna, ali vjerujem ne zadugo. U toj županiji koncesiju za opskrbu prirodnim plinom njihovih potrošača, dobila je hrvatsko-slovačka tvrtka EMANITE.

Kao koncesionari, odnosno distributeri prirodnog plina, HEP Plin d.o.o. Osijek, opskrbljuje približno 50 tisuća potrošača koji godišnje potroše više od 130 milijuna prostornih metara plina. Od više od 1500 kilometara izgrađene plinske mreže, mi smo vlasnici tri četvrtine plinovoda i postrojenja, dok su nam preostali dio davatelji koncesije povjerili na brigu i održavanje. Iz iznesenih podataka razvidno je da smo u Republici Hrvatskoj od više od 40 koliko ih ima na području naše države drugi po veličini koncesionar. Ispred nas je samo Zagrebačka plinara, no mi smo ipak prvi prema broju dodijeljenih koncesija, jer slijedeći po redu distributer ima samo tri ugovora o koncesiji.

Ono što posebno želim naglasiti, jest činjenica da se dobivanjem koncesija, posebno onih dugoročnih, osigurava dovoljno posla, što daje dodatnu sigurnost da se na otvorenom tržištu dokažemo i osiguramo mirnu budućnost našim radnicima i njihovim obiteljima.

Što se tiče našeg poslovanja u proteklој godini, nisam potpuno zadovoljan onim što smo u tom razdoblju ostvarili, osobito ne našim ulaganjem u kapitalne investicije. To, međutim, ne ovisi samo o nama i našim željama. Jer, prema novom Zakonu o komunalnom gospodarstvu, regulirano je da se naknada koju plaćaju budući kupci plina, uplaćuje u proračun, a ne više distributeru kako je to bilo do sada. Zbog općepoznatog stanja u državi, ta se sredstva preusmjeravaju u neke druge svrhe, a ne u plinifikaciju. Zbog toga smo ove godine izgradili "samo" tridesetak kilometara plinske mreže. Ako se uzme u obzir da se iz raspoloživih sredstava financirala i obnova dotrajale mreže, takav odnos prema distributerima plina može značajno usporiti širenje plinifikacije u cijeloj državi. Mi za sada imamo sreću što smo u proteklih 26 godina, koliko se bavimo plinifikacijom, izgradili golemu plinsku mrežu i prateća postrojenja, pa taj problem lakše podnosimo. No, mi se želimo širiti čak i prema udaljenijim županijama u kojima plinifikacija tek predstoji. Na to nas prisiljava sve nepostednija bitka na otvorenom tržištu rada i ulaganja.

DOBIVANJEM KONCESIJA, POSEBNO ONIH DUGOROČNIH, OSIGURAVAMO DOVOLJNO POSLA, ŠTO DAJE DODATNU SIGURNOST DA SE NA OTVORENOM TRŽIŠTU DOKAŽEMO I OSIGURAMO MIRNU BUDUĆNOST NAŠIM RADNICIMA I NJIHOVIM OBITELJIMA

BARANJA ČEKA

Premda ne baš utješno, spomenimo naše potencijalne kupce u Baranji, koji već nekoliko godina željno očekuju plin u svojim domovima i tvrtkama u kojima rade. Prelaskom rijeke Drave i plinifikacijom gradskih naselja Tvrđavica i Podravlje, plin je učinio samo jedan mali korak prema Baranji. Mi kao tvrtka želimo u što skorijoj budućnosti prihvatiti i izazov plinifikacije Baranje. Koliko smo u tomu odlučni, najbolje govori podatak da za to područje već imamo pripremljenu tehničku dokumentaciju za izgradnju plinovodne mreže u svim mjestima, a to je otprilike 500 kilometara nove mreže. Imamo, također, i izvedbene projekte za prvu fazu radova od približno 130 kilometara nove mreže. S obzirom da cjelokupna dokumentacija stoji pripremljena već više od dvije godine čekajući povoljne financijske uvjete, postale su nam nevažeće lokacijske dozvole. Kako dobavljač plina, u našem slučaju INA Zagreb, nije izgradila dogovorene magistralne plinovode, niti mi nismo došli u prigodu za početak radova na plinifikaciji Baranje. A pritisak potencijalnih korisnika plina na tom području sve je veći. Vjerujemo da je u INI trenutačno najveći problem i prepreka za taj posao, nedostatak sredstava u ovom vremenu njihova preobликovanja te da će taj problem u bliskoj budućnosti riješiti novoosnovana tvrtka PLINACRO. To temeljimo i na činjenici da je u bliskoj prošlosti došlo do znatnijeg povećanja cijene plina, iz koje se financiraju i tako velike investicije. Prema našim saznanjima, riječ je o čak 12 milijuna eura. Istodobno nama u istočnoj Slavoniji, od biknog značenja je i magistralni plinovod Kutina - Slavonski Brod, jer postojeći plinovod premalog je promjera u zimskim mjesecima povećane potrošnje i ne zadovoljava želje naših kupaca. No, i to je značajna investicija na koju će trebati pričekati.

Prema našem planu i programu poslovanja u nastupajućoj 2003. godini, namjera nam je uložiti čak 14 milijuna kuna, od čega dio za novu investicijsko-tehničku dokumentaciju, 3,5 milijuna za zamjenu i rekonstrukciju starih plinovoda, a 5,5 milijuna kuna za izgradnju nove plinske mreže, najvećim dijelom kod novog davatelja koncesije, a to je područje grada Slatine. Približno 4 milijuna kuna namjeravamo uložiti u povećanje kvalitete rada kompletne tvrtke, što podrazumijeva obnovu naših dotrajalih postrojenja te nabavu alata i informatičke opreme.

POTEŠKOĆE I S NAPLATOM PLINA

I za kraj spomenut ću naplatu naših potraživanja od potrošača za preuzeti plin. Odmah moram reći da se nenaplaćena realizacija kod nas svakoga mjeseca penje na iznos od približno 30 milijuna kuna. Ako uzmemo u obzir da fakture za potrošeni plin potrošačima isporučujemo svaki mjesec s rokom uplate do polovice mjeseca, onda sve nije tako loše. Jer, uplate često stižu i poslije tog roka, pa se njihovo evidentiranje prenosi u idući mjesec. Imamo i potrošača kod kojih se dug protegne čak i do 70 dana, zbog čega smo prisiljeni i na represivne mjere naplate naših potraživanja. Ako tomu dodamo da naš dobavljač INA Zagreb nam za isporučeni plin očitava i isporučuje fakture svakih petnaest dana, vidljivo je u kakve nas nepovoljne okolnosti dovode nesavjesni potrošači.

Ali, postoje prijedlozi da se utrošak plina potrošačima omogući i akontacijskim uplatama. Ali, to bi nas odvelo u još veća potraživanja, jer tada ne bi mogli naplatiti naša potraživanja iskapčanjem tijekom cijele godine, a još manje kamate na dug. Ono što možemo učiniti jest prepustiti volji potrošača da sami tijekom svih mjesecí u godini uplaćuju povećane rate, pa će im zimsko razdoblje biti financijski povoljnije. To ovisi o osobnoj odluci svakog našeg kupca.

Moram još naglasiti, da naših ukupno 127 radnika u najboljem mogućem opsegu obavlja svoj posao, što nam je već nekoliko posljednjih godina omogućilo pozitivno poslovanje. Na to sam posebno ponosan. Kako bi i nadalje zadržali takav uspjeh tvrtke, nastojat ćemo i u nastupajućoj godini poraditi na povećanju opsega posla, jer jedino takav odnos prema poslu i potrošačima od kojih živimo, donosi dobre financijske rezultate.

Zato na kraju svima njima, našim davateljima koncesija, svim potrošačima plina i radnicima Hrvatske elektroprivrede, želim blagoslovljen Božić i božji blagoslov svima u dosizanju poslovnih i privatnih uspjeha. Neka nam svima bude sretna i uspješna nastupajuća 2003. godina, poručio je Zvonko Fadljević.

J. Huremović

Slika 10. Članak u mjesečniku HEP vjesnik [3]

Realizirani projekti plinofikacije na području slavonske regije pridonijeli su razvoju gospodarstva, komunalnih službi te standardu kućanstava u mnogim općinama-naseljima. Tako su neke općine odavala priznaje „Distribuciji plina“ za učinkovit doprinos. [7]

PRIZNANJE GRADA POŽEGE OSJEČKOM POGONU ZA DISTRIBUCIJU PLINA

DOPRINOS RAZVOJU POŽEŠTINE

U POVODU proslave Dana grada Požege i blagdana Sv. Grgura, Pogonu za distribuciju plina DP Elektroslavonija Osijek, koji je na prostoru Požeštine prisutan već više od 20 godina, a od prošle godine je i aktualni koncesionar na svečanoj sjednici uručeno je priznanje i zlatna plaketa za dugogodišnju uspješnu suradnju i postignute rezultate. U ime Pogona, javno priznanje primio je njegov upravitelj Zdravko Fadljević. U obrazloženju za dodjelu priznanja stoji da je Pogon za distribuciju plina zaslužan za izgradnju 121 kilometra plinske mreže u Požeštini, na koju je priključeno skoro četiri tisuće potrošača. Plinifikacija u gradu Požegi započela je još 1974. godine, a njezin rezultat je stopostotna plinifikacija grada i prigradskih naselja.

Tijekom posljednjih 20 godina potrošnja prirodnog plina na ovim prostorima, HEP, DP Elektroslavonija Osijek – Pogon za distribuciju plina, potvrdio se kao pouzdan distributer energenta koji korisnicima omogućuje bolju kvalitetu življenja i jedan je od glavnih čimbenika energetskog razvoja Požeštine, rekao je gradonačelnik Požege Branko Skorup na svečanosti u Gradskoj vijećnici, uručujući priznanje Z. Fadljeviću.

Tijekom ove svečanosti uručene su i priznanja pojedincima, poduzećima i športskim klubovima za doprinos razvitku ovoga kraja. Tako je odlukom Gradskog vijeća Počasni građanin Požege postao Ljubo Kuntarić, poznati hrvatski skladatelj, nagrada za životno djelo pripala je Krunoslavu Matešiću, profesoru Filozofskog fakulteta u Zagrebu koji je i član uređivačkog odbora Godišnjaka Požeštine "Zlatna dolina", te Mirku Tomaševiću, dugogodišnjem profesoru i pedagogu požeške Gimnazije. Godišnja nagrada grada Požege uručena je petorici uglednih Požežana: Draganu Adžiću, Luci Perić, Ivanu Rozmanu, dr. Vesni Vezmar i dr. Josipu Višatickom, dok je posebna nagrada za razvoj športa pripala NK "Croatia" iz Mihaljevaca.

Z. Fadljević, rukovoditelj Pogona za distribuciju plina, sa zaslženim priznanjem grada Požege

Što se tiče nagrade HEP-ovom Pogonu za distribuciju plina iz Osijeka, valja još naglasiti da je izgradnja plinovodne mreže u Požegi započela polaganjem visokotlačnog plinovoda Čaglin-Požega u duljini od 26 kilometara, te izgradnjom MRS u Požegi prije 20 godina, čime je otpočela plinifikacija Požeštine. Sve ostalo što je učinjeno do današnjeg dana, izgrađeno je pretežito vlastitim sredstvima Pogona, što je konačno rezultiralo i prošlogodišnjim potpisivanjem temeljnog Ugovora o koncesiji kojim se Pogon kao distributer plina i koncesionar, između ostaloga, obvezao na uredno i savjesno obavljanje distribucije plina do krajnjih korisnika, te na stručno i kvalitetno vođenje procesa eksploatacije i održavanja plinskog sustava na ovom području.

J. Huremović

HEP VJESNIK 123, TRAVANJ 2001.

Slika 11. Članak u mjesečniku HEP vjesnik [3]

Priznanje

GRB GRADA MIHOLJCA HEP PLIN

U povodu Dana grada Donjeg Miholjca, 29. rujna o.g. Gradsko je vijeće dodijelilo najveće gradsko priznanje – «Grb Grada» HEP Plinu d.o.o., koji svoje sjedište ima u Osijeku. Na svečanoj sjednici to je priznanje direktoru HEP Plina Zdravku Fadljeviću uručio gradonačelnik Donjeg Miholjca, Eduard Šrajer za iznimna ostvarenja u svim područjima djelatnosti gospodarskog i materijalnog razvoja Grada.

Još kao Mjesna zajednica, Donji Miholjac je naručio izvedbeni projekt plinifikacije, koji je završen 1975. godine. Već je sljedeće godine plin pušten pa je Donji Miholjac prvo mjesto u Slavoniji s gradskim plinovodom. Plinska mreža se tijekom godina širila pa je prije deset godina izgrađen plinovod u općini Magadenovac s od 42 kilometra. Godinu dana kasnije izgrađ plinovod od Donjeg Miholjca do Rakitovice samu Rakitovicu. Plin je 1997. godine pušten naselja Podravski Podgajci, Sveti Đurad, M Poreč, Radikovce i Golince. Općine Viljevo Podravska Moslavina plin su dobile 2000. izgradnjom zajedničke MRS-e Cret, a ove i naselje Krunoslavlje biti plinificirano. Tim i posljednje naselje u Pogonskom uredu D Miholjac, kojeg vodi Zvonko Jović - dobit

Sve to dovoljan je razlog za visoko p HEP Plinu, ali i dobra preporuka za nove, t poslove.

Gradonačelnik Donjeg Miholjca, Eduard Šrajer, uručio je priznanje direktoru HEP Plina Zdravku Fadljeviću

10 HEP VJESNIK 176 (216), rujan 2005.

Slika 12. Članak u mjesečniku HEP vjesnik [3]

ZDRAVKO FADLJEVIĆ, DIREKTOR HEP-PLIN d.o.o.

OTEŽANA ULAGANJA

PROŠLU 2002. godinu, ocjenjujem kroz nekoliko realiziranih temeljnih ciljeva: sigurnu i kontinuiranu opskrbu naših kupaca kvalitetnim plinom, porast broja potrošača i potrošnje plina te ulaganja u investicije, što sve pridonosi dobrim financijskim rezultatima poslovanja. Što se tiče opskrbe naših kupaca kvalitetnim plinom time smo zadovoljni, jer osim nekih sitnijih kvarova i uspješnih intervencija, nije bilo većih problema. Iznimka je veljača 2002. kada je, ne našom krivnjom, došlo do raspada plinskog sustava i duljeg prekida u opskrbi potrošača. Možemo također biti zadovoljni i porastom broja kupaca i potrošnjom plina, jer smo tijekom prošle godine priključili 1.650 novih kupaca, tako da danas ih imamo ukupno 51.000 koji godišnje potroše približno 150 milijuna prostornih metara plina. To je u odnosu na Plan više za 13 posto, a u odnosu na ostvarenje u 2001. godini više za 10,7 posto. S planiranim iznosom ulaganja nismo u potpunosti zadovoljni, jer smo od planiranih 22 milijuna kuna ostvarili 8,5 milijuna. Najznačajnija ulaganja imali smo na području Požeštine, gdje već ove godine očekujemo priključenje na plinsku mrežu većeg broja sušara duhana koji plin troše kada ga ima dovoljno, a to su ljetni mjeseci. Inače, smanjena ulaganja rezultat su velikih problema u dobivanju isprava za građenje, gdje je, prije same građevinske dozvole, potrebno pribaviti tridesetak dozvola.

Ipak, što se tiče financijskih rezulatata našeg poslovanja u protekloj godini, moramo biti zadovoljni. Kao i prethodne tri godine, preliminarni rezultati govore o pozitivnom financijskom poslovanju. Ovdje moramo izdvojiti da smo u samom početku našeg samostalnog poslovanja, nakon preoblikovanja poduzeća, a to je razdoblje od 1. srpnja do 31. prosinca protekle godine, poslovali s gubitkom, jer je dobitak za razdoblje od 1. siječnja do 30. lipnja ostao u vlasničkom društvu.

Naši planovi za 2003. godinu usmjereni su na sigurnu i kontinuiranu opskrbu plinom svih naših potrošača, na zamjenu i revitalizaciju distribucijske plinske mreže, te priključivanje novih kupaca na već izgrađenu mrežu. Sve to želimo postići uz potporu marketinga, izgradnju ekonomsko-tehničkih plinovoda, izradu tarifnog sustava za plin te kroz cijenu opskrbe koja će nam i nadalje omogućiti pozitivno poslovanje.

Budući da se HEP još uvijek nalazi u fazi restrukturiranja, ima poteškoća u našem poslovanju, prvenstveno stoga što još nisu riješeni međusobni odnosi između HEP-a d.d. i ovisnih društava. Međutim, vjerujem da će, kao i do sada, Uprava i Nadzorni odbor znati uspješno riješiti sva otvorena pitanja.

Slika 13. Članak u mjesečniku HEP vjesnik (2000.) [3]

4. Umjesto zaključka

Svojim stručnim i predanim radom u početnim godinama pravnog osamostaljenja tvrtke „Distribucija plina“ te u vrijeme agresije na Republiku Hrvatsku Zdravko Fadljević je značajno pridonosio rješavanju razvojnih i poslovnih pitanja u vrlo nepovoljnim uvjetima. Uz inženjere i tehnologe u procesu plinofikacije značajan je bio i doprinos ekonomiste Zdravka Fadljevića koji je svojim ekonomskim pristupom i organizacijskim kvalitetama rješavao niz problema u ne baš povoljnim poslovnim, uvjetima.

Literatura

[1] Ivanović, Milan – monografija „40 godina HEP Plina Osijek, 1975.-1015.,“ HEP Plin, Osijek, 2016.

[2] “Elektroslavonija”, list radne organizacije “Elektroslavonija“, godišta 1974.-1990.

[3] HEP vjesnik, Zagreb

[4] HEP PLIN d.o.o. Osijek

[5] Ivanović, Milan: Definiranje i realizacija energetske politike na području ZO Osijek, „Energija”, Zagreb, Vol. 35, sv. 1, str. 33 – 40

[6] Ivanović, Milan: Plinifikacija domaćinstava u Slavoniji i potrošnja el. energije; 7. Međunarodni skup plinskih stručnjaka, Opatija, 1992; CPZ, Zagreb, Zbornik str..111 -121

[7] Ivanović, Milan; Tonkovič, Zlatko; Korištenje prirodnog plina u Slavoniji i Baranji od 1972. do 2014. godine; PLIN ' 2015; Osijek, 26- 28.10.2015. Zbornik, 66–75 str.

IoT sustavi za nadzor kvalitete zraka i energetske učinkovitosti u procesnoj industriji
IoT systems for monitoring air quality and energy efficiency in the process industry

S. Švoger[1,*], Z. Busija[1], M. Perić[1], T. Tomić[1]

[1]Sveučilište Sjever, 104. Brigade 3, 42000 Varaždin

[*]Autor za korespondenciju. E-mail: sinisa.svoger@unin.hr

Sažetak

Rad prikazuje primjenu Interneta stvari (*Internet of Things – IoT*) i protokola za komunikaciju senzora male snage na velike udaljenosti (*Long Range Wide Area Network – LoRaWAN)* za nadzor kvalitete zraka i energetske učinkovitosti u procesnoj industriji. Korišten je uređaj – senzor s odašiljačem (*Ambient VOC, CO_2, Temperature and Humidity Transmitter*) za mjerenje ugljičnog dioksida (CO_2), hlapljivih organskih spojeva (*Volatile Organic Compounds – VOC*), temperature (T) i relativne vlažnosti (%rH), povezan s *LoRaWAN* pristupnikom (*Gateway*) radi prijenosa podataka prema ISGE (Industrijski sustav za gospodarenje energijom) aplikaciji. Aplikacija omogućava pregled, analizu i pohranu mjerenih podataka u stvarnom vremenu. Opisane su prednosti sustava poput niske potrošnje energije, velikog komunikacijskog dometa i jednostavne instalacije, što ga čini pogodnim za primjenu u konceptima Industrije 4.0.

Ključne riječi: IoT, LoRaWAN, Nadzor CO_2, Industrija 4.0, Energetska efikasnost

Abstract

This paper presents the application of the Internet of Things (IoT) and the Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) communication protocol for monitoring air quality and energy efficiency in the process industry. The system is based on the use of an Ambient transmitter sensor device for measuring CO_2, volatile organic compounds (VOC), temperature (T), and relative humidity (%rH). The sensor is connected to a LoRaWAN gateway responsible for transmitting data to the ISGE (Industrial Energy Management System) application. The ISGE application enables real time visualization, analysis, and storage of measured data. The paper highlights the main advantages of the proposed system, including low energy consumption, long communication range, and simple installation, making it highly suitable for Industry 4.0 applications.

Key words: IoT, LoRaWAN, CO_2 monitoring, Industry 4.0, Energy Efficiency

1. Uvod

Suvremena procesna industrija suočava se s rastućim zahtjevima za kontinuiranim nadzorom radne okoline i optimizacijom potrošnje energije. Prisutnost povišenih koncentracija ugljičnog dioksida (CO_2) i hlapljivih organskih spojeva (*Volatile Organic Compounds* – VOC) u zatvorenim industrijskim prostorima predstavlja značajan rizik za zdravlje radnika, uzrokujući iritaciju dišnih putova, umor, glavobolje te dugoročna oboljenja. Osim zdravstvenih rizika, neučinkovito upravljanje energijom u industrijskim postrojenjima doprinosi povećanju operativnih troškova i negativnom utjecaju na okoliš, što je u suprotnosti s ciljevima zelene tranzicije i europskim regulatornim okvirom.

Tradicionalni žičani sustavi za nadzor okolišnih parametara često su nepraktični za ugradnju u složenim industrijskim okruženjima zbog visokih troškova instalacije i ograničene fleksibilnosti. Kao odgovor na te izazove, tehnologije Interneta stvari (*Internet of Things* – IoT) u kombinaciji s protokolom bežične komunikacije dugog dometa i niske snage (engl. Long Range Wide Area Network (*LoRaWAN*) nude skalabilno, energetski učinkovito i jednostavno rješenje za bežično prikupljanje i prijenos podataka.

U okviru istraživanja opisanog u ovom radu implementiran je IoT sustav za nadzor kvalitete zraka i energetske učinkovitosti. Sustav se temelji na senzorskom odašiljaču Enless Wireless TX CO_2/VOC/T&H AMB 600-023 za mjerenje VOC-a (ppb), CO_2 (ppm), T (°C) i %rH, bežično povezanom putem LoRaWAN pristupnika s aplikacijom ISGE (Industrijski sustav za gospodarenje energijom). Aplikacija ISGE omogućuje pregled, analizu i pohranu mjerenih podataka u stvarnom vremenu (Slika 1).

Slika 1. Početna stranica aplikacije ISGE

Cilj rada jest prikazati arhitekturu i funkcionalnost implementiranog sustava, analizirati prednosti i ograničenja primijenjenih tehnologija te razmotriti perspektivu njihove šire primjene u kontekstu Industrije 4.0. Struktura rada obuhvaća pregled IoT tehnologije i LoRaWAN protokola, razmatranje koncepta Industrije 4.0, opis senzorskog uređaja i sustava ISGE, uz prikaz rezultata mjerenja te zaključna razmatranja.

2. Industrija 4.0

Pojam „Industrija 4.0" prvi je put uveden u Njemačkoj 2011. godine, kada su predstavnici industrije, politike i akademske zajednice taj koncept predstavili na sajmu Hannover Messe kao dio vladine inicijative za jačanje konkurentnosti prerađivačke industrije [1].
Kako bi se bolje razumio koncept Industrije 4.0, važno je sagledati povijesni kontekst industrijskog razvoja. Industrija 4.0 predstavlja četvrtu industrijsku revoluciju koja se odvija u suvremenom dobu, a kojoj su prethodile tri prethodne revolucije, svaka obilježena specifičnim tehnološkim dostignućima koja su temeljito promijenila način proizvodnje [2].
Pregled ključnih karakteristika svake industrijske revolucije prikazan je u Tablici 1.

Tablica 1. Pregled industrijskih revolucija

Industrijska revolucija	Razdoblje (početak)	Karakteristike
1.	~1760.	Mehanizacija, parni stroj, tekstilna industrija
2.	~1860.	Elektrifikacija, upotreba fosilnih goriva
3.	~1960.	Automatizacija, informatizacija, elektronika
4.	~2011.	Digitalizacija, Robotizacija, IoT, AI

Prema autorima [3], Industrija 4.0 temelji se na skupu ključnih tehnologija koje omogućuju stvaranje inteligentnih tvornica i njihovu integraciju u širi proizvodni ekosustav. Te tehnologije obuhvaćaju napredne proizvodne sustave (*Advanced Manufacturing Solutions*), aditivnu proizvodnju (*Additive Manufacturing*), proširenu stvarnost (*Augmented Reality*), simulacije međusobno povezanih strojeva u svrhu optimizacije procesa, horizontalnu i vertikalnu integraciju informacijskih sustava (*Horizontal and Vertical Integration*), industrijski internet (*Industrial Internet*), tehnologije oblaka (*Cloud Robotics*), kibernetičku sigurnost (*Cyber Security*) te analitiku velikih podataka (*Big Data Analytics*).
Autor [4] naglašava da se četvrta industrijska revolucija, ne odnosi samo na pametne i međusobno povezane uređaje i sustave. Njezin je opseg daleko širi. Istovremeno se odvija značajni napredak u područjima koja sežu od genetike do nanotehnologije, od obnovljivih izvora energije do kvantnog računarstva. Upravo spajanje tih tehnologija i njihova međusobna interakcija u fizičkoj, digitalnoj i biološkoj domeni čini četvrtu industrijsku revoluciju temeljno drukčijom od svih prethodnih.
Četvrta industrijska revolucija omogućila je nove proizvode i usluge koji uz gotovo nikakve troškove povećavaju učinkovitost svakodnevnih života. Naručivanje prijevoza, pronalazak leta, kupnja proizvoda, plaćanje, slušanje glazbe ili gledanje filma sve se to danas može obaviti na daljinu. Prednosti tehnologije za potrošače neupitne su. Internet, pametni telefon i tisuće aplikacija olakšavaju život. Osim ekonomskih i proizvodnih koristi, četvrta industrijska revolucija ima značajan utjecaj i na kvalitetu te duljinu ljudskog života. Napredak u medicini, biotehnologiji i genetici omogućuje ranije otkrivanje bolesti, preciznije

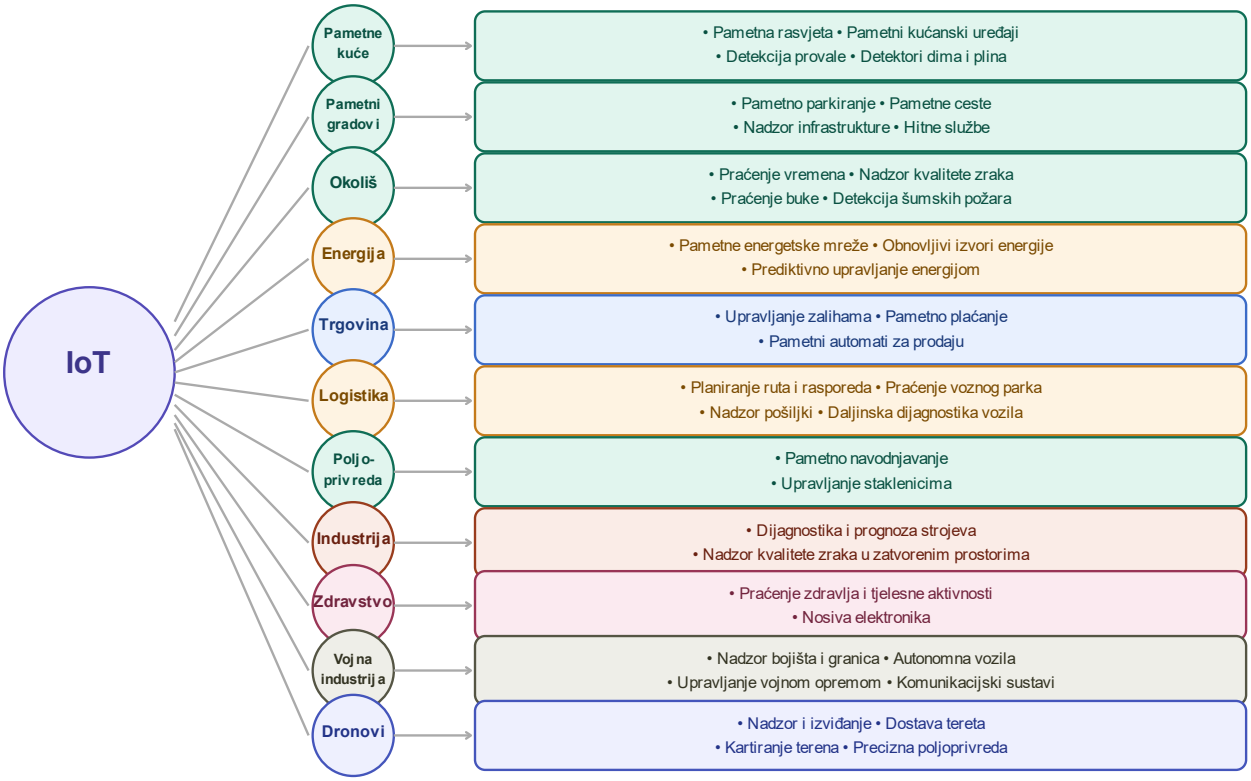
dijagnoze i učinkovitije terapije, a pojavom umjetne inteligencije stvaraju se prediktivni modeli [5] koji omogućuju detekciju bolesti prije pojave prvih simptoma. Navedeni primjeri nagovještavaju postupni prijelaz prema konceptu Industrije 5.0, koja zadržava sve tehnološke temelje Industrije 4.0, ali u središte stavlja pristup usmjeren na čovjeka (*human-centric approach*) i sinergiju između čovjeka i naprednih tehnoloških sustava.

3. Internet stvari

Autori koji su istraživali koncepte Industrije 4.0 [1, 2, 3, 4], kao i autor koji se bavi nadolazećom Industrijom 5.0 [5], suglasni su da Internet stvari predstavlja jednu od temeljnih i nezaobilaznih tehnologija suvremenih industrijskih sustava.

IoT je definiran kao dinamična globalna mrežna infrastruktura sa sposobnostima samo konfiguracije, temeljena na standardnim i interoperabilnim komunikacijskim protokolima. U takvoj infrastrukturi fizički i virtualni elementi posjeduju vlastite identitete, fizičke atribute i virtualne osobnosti, koriste inteligentna sučelja te su integrirani u informacijsku mrežu, omogućujući kontinuiranu razmjenu podataka između korisnika i njihovih okruženja [6].

Pod fizičke elemente mogu se definirati i IoT uređaji različitih vrsta, od nosivih senzora i pametnih satova do automobila i industrijskih strojeva koji kontinuirano prikupljaju podatke što ih sustavi za analizu obrađuju i pretvaraju u korisne informacije za poduzimanje korektivnih mjera lokalno ili putem udaljenog pristupa. Primjene IoT tehnologije u različitim domenama prikazane su na Slici 2.



Slika 2. Primjena IoT tehnologije (prilagođeno i prošireno prema [7])

4. LoRaWAN

Za prijenos podataka prikupljenih IoT uređajima neophodna je odgovarajuća komunikacijska infrastruktura. Svi IoT uređaji moraju na neki način komunicirati slati izmjerene podatke prema centralnom sustavu za obradu i analizu. U tu svrhu razvijene su različite vrste bežičnih mreža, od kratkog dometa poput Bluetootha i Wi-Fi-ja, do mreža koje pokrivaju velike udaljenosti.

Za primjene u kojima su uređaji raspršeni na velikim površinama, rade na baterijskom napajanju i šalju relativno male količine podataka, razvijene su posebne mreže niske snage i velikog dometa poznate pod nazivom LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Osim LoRaWAN-a, u skupinu LPWAN tehnologija ubrajaju se i Sigfox, NB-IoT, Ingenu (RPMA) i Telensa, pri čemu svaka tehnologija ima specifične prednosti i ograničenja ovisno o primjeni. Važno je napomenuti da kratica LoRa (*Long Range*) označava fizičku modulacijsku tehniku prijenosa signala, dok LoRaWAN predstavlja komunikacijski protokol i mrežnu arhitekturu. Detaljna usporedba navedenih LPWAN tehnologija prema ključnim tehničkim parametrima prikazana je u Tablici 2.

Tablica 2. Usporedba mreža niske snage i velikog dometa: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, Ingenu (RPMA) i Telensa (prema [8, 9]).

Značajka	LoraWAN	Sigfox	NB-IoT	Ingenu	Telensa
Modulacija	CSS	BPSK	QPSK	CDMA	UNB 2-FSK
Troškovi	Malo	Srednje	Srednje	Malo	Visoko
Širina pojasa	125 -250 kHz	100 Hz	200 kHz	1 MHz	100 kHz
Veličina paketa	250 B	8 B	13 B	B	65 kB
Prilago. brzina prijenosa	Da	Ne	Ne	Da	Ne
Otpornost (smetnje)	Visoko	Visoko	Nisko	Nisko	Visoko
Lokalizacija	Da	Da	Ne	Ne	Ne
Privatna mreža	Da	Ne	Ne	Da	Ne
Sigurnost	Da	Ne	Da	Da	Da

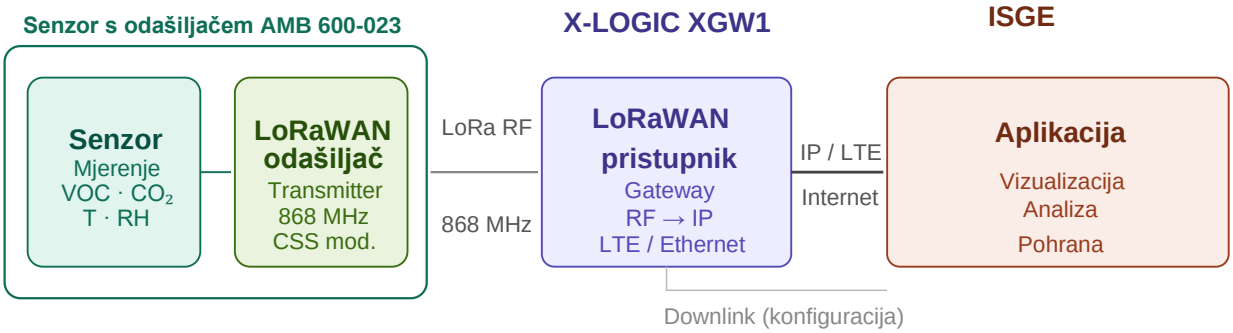
Ključne prednosti LoRaWAN tehnologije uključuju iznimno nisku potrošnju energije koja omogućuje rad uređaja na bateriji i do nekoliko godina bez zamjene, veliki komunikacijski domet koji u industrijskim uvjetima iznosi od 2 - 15 km, te jednostavnu i ekonomičnu instalaciju bez potrebe za složenom žičnom infrastrukturom [8, 9]. Osim toga, LoRaWAN radi u nelicenciranom ISM frekventnom pojasu (868 MHz u Europi), što eliminira troškove licenciranja spektra, a jedna pristupna stanica može opsluživati tisuće senzorskih čvorova istovremeno [10, 11].

S druge strane, LoRaWAN ima i određena ograničenja. Ograničena propusnost podataka maksimalna veličina paketa iznosi 250 bajtova čini ga neprikladnim za prijenos velikih količina podataka ili multimedijskog sadržaja. Dodatno, u gustim industrijskim okruženjima s velikim brojem metalnih površina i elektromagnetskih smetnji može doći do degradacije signala i smanjenja pouzdanosti veze [8].

5. Opis sustava za nadzor kvalitete zraka i energetske učinkovitosti

Na Slici 3 nalazi se opisani sustav za nadzor kvalitete zraka i energetske učinkovitosti koji se sastoji od tri ključne komponente: senzorskog odašiljača Enless Wireless TX CO_2/VOC/T&H AMB 600-023 za mjerenje okolišnih parametara, LoRaWAN X-LOGIC XGW1 pristupnika za bežični prijenos podataka te aplikacije ISGE za vizualizaciju, analizu i pohranu izmjerenih veličina u stvarnom vremenu. Senzorski odašiljač mjeri ugljični dioksid (CO_2), hlapljive organske spojeve (VOC), temperaturu (T) i relativnu vlagu (%rH), te izmjerene podatke bežično prenosi na frekvenciji 868 MHz putem CSS modulacijske tehnike. LoRaWAN pristupnik X-LOGIC XGW1 prima bežični LoRa RF signal i pretvara ga u IP paket koji se prenosi putem LTE mobilne mreže ili Ethernet veze prema internetu. Aplikacija ISGE prima podatke te omogućuje njihovu vizualizaciju, analizu i pohranu u stvarnom vremenu.

Komunikacija je obostrana uz uobičajeni uplink prijenos podataka od senzora prema aplikaciji, sustav podržava i downlink komunikaciju u smjeru ISGE → pristupnik → senzor, u svrhu daljinske konfiguracije parametara uređaja.



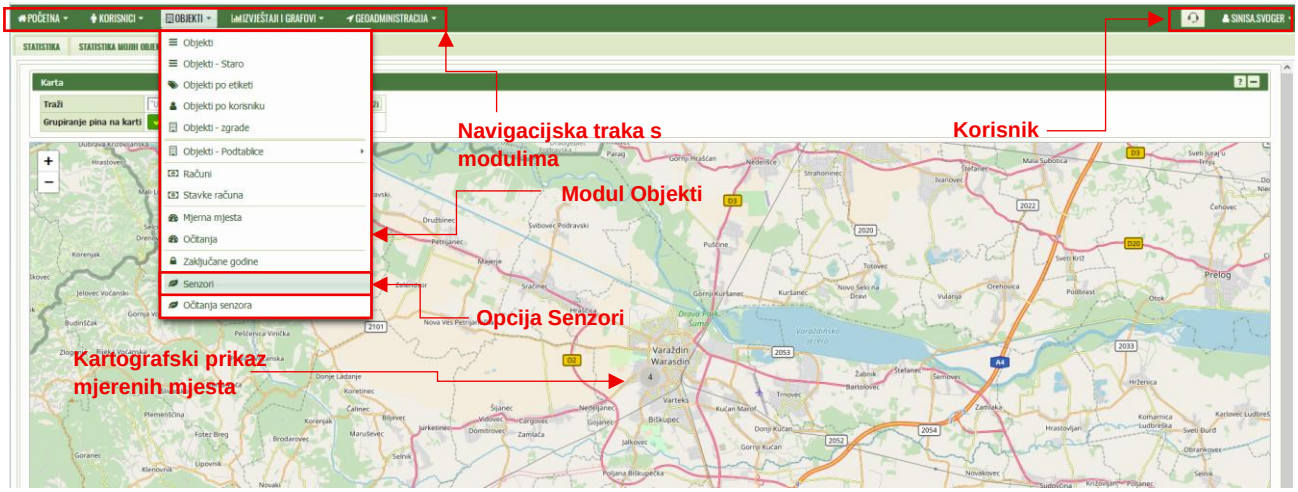
Slika 3. Blok shema IoT sustava prikazanog u članku temeljenog na LoRaWAN tehnologiji

Slika 4a prikazuje LoRaWAN pristupnik X-LOGIC XGW1 s vanjskom 6 dBi fibreglass antenom, montiran na metalnu konzolu a Slika 4b senzorski odašiljač AMB-023.

a) b)

Slika 4. a) LoRaWAN pristupnik X-LOGIC XGW1 b) senzorski odašiljač AMB-023

Nakon opisanog hardvera, senzorskog odašiljača i LoRaWAN pristupnika, prikupljeni podaci automatski se prenose prema aplikaciji ISGE (Informacijski sustav za gospodarenje energijom), web-baziranoj platformi koja omogućuje njihovu vizualizaciju, analizu i pohranu u stvarnom vremenu. Početna stranica za prijavu u aplikaciju ISGE prikazana je na Slici 1, dok je grafičko sučelje s kartografskim prikazom mjernih mjesta prikazano na Slici 5.

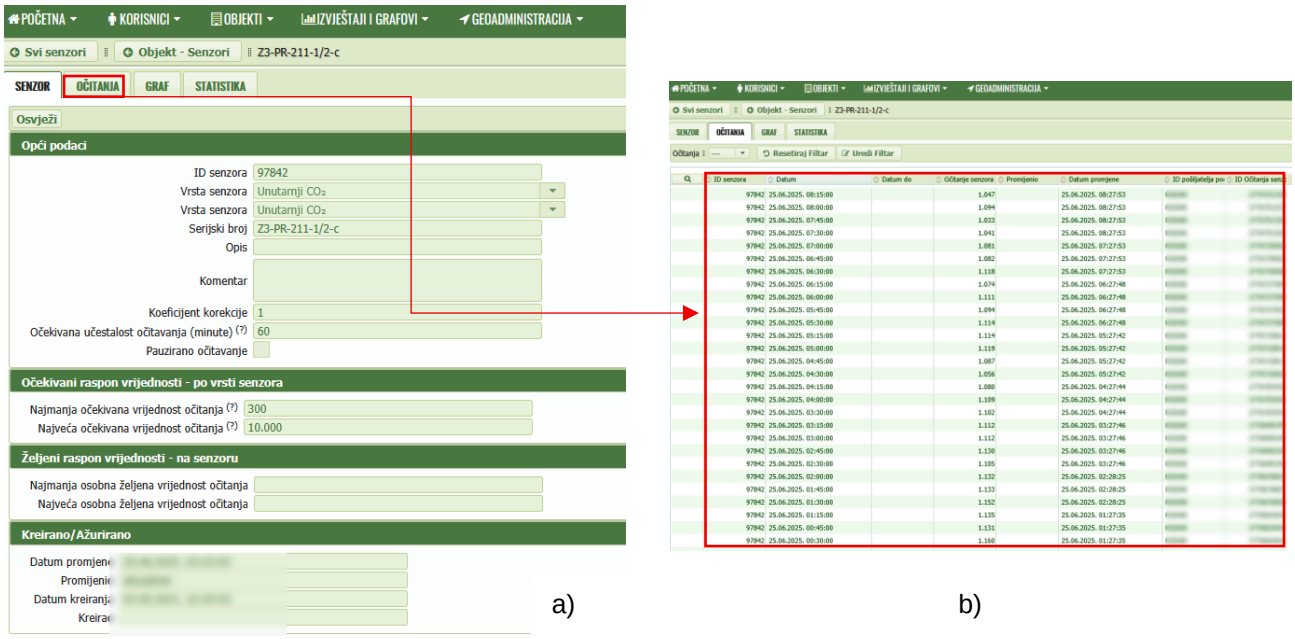


Slika 5. Grafičko sučelje aplikacije ISGE s kartografskim prikazom i modulom Objekti

Grafičko sučelje aplikacije ISGE organizirano je u nekoliko funkcionalnih modula dostupnih putem navigacijske trake: Početna, Korisnici, Objekti, Izvještaji i grafovi te Geoadministracija. Modul Objekti posjeduje različite opcije koje omogućuju upravljanje mjernim mjestima, senzorima i očitanjima, dok modul Izvještaji i grafovi pruža mogućnost analize i vizualizacije izmjerenih podataka. Odabirom opcije Senzori ili Očitanja senzora unutar modula Objekti prikazuje se popis dostupnih senzorskih uređaja s informacijama o identifikatoru, vrsti mjerene veličine, objektu instalacije te datumu posljednjeg očitanja (Slika 6). Crvenom bojom označen je odabrani senzor unutarnjeg CO_2 (ID: 97848) za kojeg se prikazuju detaljni grafovi i tablice izmjerenih vrijednosti.

Slika 6. Popis dostupnih senzora i očitanja s označenim odabranim senzorom

Nakon odabira senzora otvara se prozor s detaljnim podacima koji je organiziran u četiri kartice: Senzor, Očitanja, Graf i Statistika. Kartica Senzor (Slika 7a) prikazuje opće podatke o uređaju identifikator senzora (ID: 97842), vrstu senzora (Unutarnji CO_2), serijski broj te očekivanu učestalost očitavanja (60 minuta). Odabirom kartice Očitanja (Slika 7b) prikazuje se tablica s izmjerenim vrijednostima za odabrani vremenski period, s mogućnošću filtriranja podataka prema datumu i vremenu.



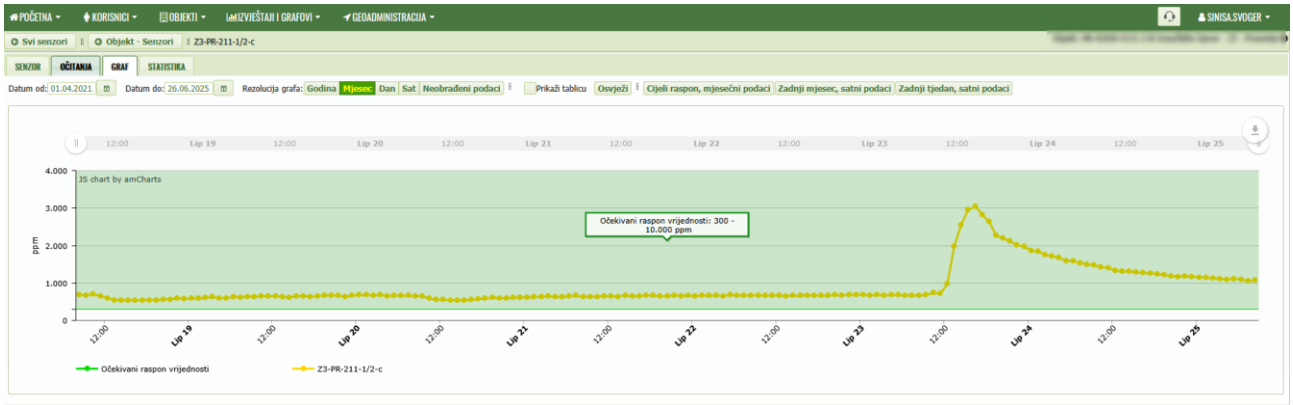
Slika 7. a) Opći podaci odabranog senzora (kartica Senzor), b) tablica izmjerenih vrijednosti (kartica Očitanja)

Slika 7b prikazuje vremenski tijek izmjerenih vrijednosti koncentracije CO_2 u određenom zatvorenom prostoru za period od 19. do 25. lipnja 2025. godine, s rezolucijom prikaza po danu.

Koncentracija CO_2 u vanjskom zraku iznosi približno 400–420 ppm, dok se u zatvorenim prostorima s dobrom ventilacijom vrijednosti kreću između 400 i 1.000 ppm. Prema smjernicama za kvalitetu unutarnjeg zraka, koncentracija CO_2 ispod 1.000 ppm ukazuje na dobru kvalitetu zraka, dok vrijednosti ispod 1.500 ppm smatraju se prihvatljivima za opću populaciju. Istraživanja su pokazala da već pri koncentraciji od 1.000 ppm dolazi do pada kognitivnih sposobnosti od 11 - 23% u usporedbi s razinom od 600 ppm, što ukazuje na važnost kontinuiranog nadzora kvalitete zraka u zatvorenim prostorima [12-13].

Osim kartice Očitanja, aplikacija ISGE omogućuje i pregled statističkih podataka odabirom kartice Statistika, koja prikazuje vrijednosti izmjerenih veličina za odabrani vremenski period, minimalnu, maksimalnu i srednju vrijednost koncentracije CO_2, temperature, vlage i VOC-a što omogućuje brzu analizu trendova i identifikaciju odstupanja od prihvatljivih granica.

Kartica Graf prikazuje vremenski tijek izmjerenih vrijednosti za odabrani period s mogućnošću odabira rezolucije prikaza (godina, mjesec, dan, sat). Slika 8 prikazuje vremenski tijek koncentracije CO_2 u promatranoj prostoriji u periodu od 1.4.2024. do 26.6.2025. Izmjerene vrijednosti uglavnom su se kretale u prihvatljivom rasponu od 500 - 700 ppm, međutim dana 24. lipnja zabilježen je nagli porast na oko 3.000 ppm, što znatno premašuje preporučenu granicu od 1.000 ppm i ukazuje na povećan broj prisutnih osoba ili nedovoljnu ventilaciju prostora.



Slika 8 Grafički prikaz koncentracije CO_2 u promatranoj prostoriji

6. Zaključak

U ovom radu opisan je IoT sustav za nadzor CO_2 i energetske učinkovitosti temeljen na LoRaWAN komunikacijskom protokolu, implementiran i testiran u zatvorenim prostorima s prisutnim osobama i aktivnim uređajima tijekom jedne godine (2024. – 2025.).

Arhitektura sustava i rezultati mjerenja dobiveni u kompleksnim uvjetima potvrđuju primjenjivost u zahtjevnim okruženjima procesne industrije u kontekstu zelene energetske tranzicije.

Rezultati praćenja potvrđuju da sustav pouzdano mjeri CO_2, VOC, temperaturu i vlagu. Prikupljeni podaci dostupni su u stvarnom vremenu putem aplikacije ISGE, što omogućuje identifikaciju obrazaca potrošnje energije i pravovremenu detekciju odstupanja, doprinoseći ciljevima energetske učinkovitosti i smanjenju operativnih troškova.

Dug vijek trajanja baterije senzorskog odašiljača (do 10 godina) uz jednostavnu instalaciju bez žične infrastrukture potvrđuje ekonomsku opravdanost rješenja.

Unatoč prednostima, ograničena propusnost LoRaWAN protokola i potreba za redovitim održavanjem predstavljaju ograničenja sustava.

U sklopu budućih poboljšanja predlaže se integracija zvučnih i svjetlosnih alarma pri prekoračenju zadanih graničnih vrijednosti.

U budućim istraživanjima planira se analiza povezanosti izmjerenih vrijednosti CO_2 s brojem prisutnih osoba te s radom industrijske opreme, što bi omogućilo preciznije upravljanje energetskom učinkovitosti.

7. Literatura

[1] Kagermann, Henning; Lukas, Wolf-Dieter; Wahlster, Wolfgang. Industry 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution // *VDI Nachrichten*, (2011), 13. (ISSN 0042-1758)

[2] Hermann, Mario; Pentek, Tobias; Otto, Boris. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios // Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Hawaii, 2016. str. 3928-3937. (ISBN 978-0-7695-5670-3)

[3] Quattrociocchi, Bernardino; Calabrese, Mario; Iandolo, Francesca; Mercuri, Francesco. *Industry Dynamics and Industry 4.0: Drones for Remote Sensing Applications*. London/New York: Routledge, 2023. (ISBN 978-1-032-35861-1) (Chapter 1 New business models in the Fourth Industrial Revolution)

[4] Schwab, Klaus. The Fourth Industrial Revolution. Cologny/Geneva: World Economic Forum, 2016. (ISBN 978-1-944835-01-9) (Chapter 1 The Fourth Industrial Revolution)

[5] Nidhya, R.; Kumar, Manish; Karthik, S.; Anand, Rishabh; Balamurugan, S. (ur.). Smart Factories for Industry 5.0 Transformation. Beverly: Wiley-Scrivener, 2025. (ISBN 978-1-394-19995-2) (Chapter 2 Personalized Healthcare Transformation via Novel Era of AI)

[6] Smith, Ian G. (ur.). The Internet of Things 2012: New Horizons. Halifax: IERC – Internet of Things European Research Cluster, 2012. (ISBN 978-0-9553707-9-3) (Chapter 1 Internet of Things – The Vision)

[7] Bahga, Arshdeep; Madisetti, Vijay. Internet of Things: A Hands-on Approach. Hyderabad: Universities Press (India) Private Limited, 2015. (ISBN 978-81-7371-954-7) (Chapter 1 Introduction to Internet of Things)

[8] Almuhaya, Mukarram A. M.; Jabbar, Waheb A.; Sulaiman, Noorazliza; Abdulmalek, Suliman. A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions // *Electronics*, 11(2022), 1; 164. (ISSN 2079-9292)

[9] Mekki, Kais; Bajic, Eddy; Chaxel, Frederic; Meyer, Fernand. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment // *ICT Express*, 5(2019), 1; 1-7. (ISSN 2405-9595)

[10 Sherazi, Hasnain Hyder Raza; Grieco, Luigi Alfredo; Imran, Muhammad Ali; Boggia, Gennaro. Energy Efficient LoRaWAN for Industry 4.0 Applications // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2021), 2; 891-902. (ISSN 1551-3203)

[11] Khairullah, Enas F.; Alghamdi, Atheer M.; Al mojamed, Mohammad M.; Zeadally, Sherali. LoRaWAN-based smart water management IoT applications: a review // *Journal of Information and Telecommunication*, 9(2025), 3; 420-446. (ISSN 2475-1839)

[12] Turana, Rachael; Mandin, Corinne; et al. Low Level Carbon Dioxide Indoors — A Pollution Indicator or a Pollutant? A Health-Based Perspective // *Environments*, 8(2021), 11; 125. (ISSN 2076-3298)

[13] Azuma, Kenichi; et al. Carbon dioxide guidelines for indoor air quality: a review // *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 34(2024). (ISSN 1559-0631)

Rad je izrađen u sklopu projekta „ZENTRIP" (IP-UNIN-TEH-2025-6), Sveučilište Sjever.

Tehno-ekonomska analiza integracije fotonaponske elektrane i kogeneracije u postrojenju drvne industrije

Techno-economic Analysis of Integrating a Photovoltaic Power Plant and Cogeneration in a Wood Industry Facility

R. Pavlović[1], R. Kljajić[2,*], K. Fekete[2], P. Marić[2]

[1]HEP ODS, Osijek, Hrvatska
[2]Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: ruzica.kljajic@ferit.hr

Sažetak

U industrijskom sektoru je nužno osigurati stabilno i neprekidno napajanje električnom energijom kako bi se osigurao kontinuitet proizvodnje i minimalni troškovi proizvodnje. Na temelju rezultata mjerenja kvalitete električne energije u postrojenju koje se bavi obradom drveta, predložene su metode pronalaska ekonomski i tehnički opravdanog rješenja kako bi se postigla sigurna i neprekidna opskrba električnom energijom. Na temelju rezultata mjerenja modeliran je industrijski potrošač integriran na distribucijsku mrežu te su analizirani utjecaji distribuiranih izvora energije (fotonaponske elektrane) za ljetni i zimski režim rada, kao i kogeneracijskog postrojenja koje kao radni medij koristi drvnu biomasu. Kroz usporedbu navedenih scenarija evaluirani su tehnički efekti poput poboljšanja naponskog profila i smanjenja gubitaka. Rad u konačnici donosi i cjelovitu ekonomsku analizu koja jasno kvantificira uštede na računima za električnu energiju za svaki pojedini scenarij. U zadnjem dijelu rada evaluiran je i širi energetski potencijal drvne biomase unutar poduzeća, uz izračun financijske dobiti koja se ostvaruje proizvodnjom i prodajom peleta.

Ključne riječi: industrijski potrošač, kogeneracija, fotonaponska elektrana, tehno-ekonomska analiza

Abstract

In the industrial sector, ensuring a stable and uninterrupted power supply is essential to guarantee production continuity and minimize production costs. Based on the power quality measurement results in a wood processing facility, methods for finding an economically and technically viable solution have been proposed to achieve a secure and continuous electricity supply. Based on these measurement results, an industrial consumer integrated into the distribution network was modeled, and the impacts of distributed energy sources—

specifically a photovoltaic power plant during summer and winter operational regimes, as well as a cogeneration plant using wood biomass as its working medium—were analyzed. Through a comparison of the stated scenarios, technical effects such as voltage profile improvement and loss reduction were evaluated. Ultimately, the paper provides a comprehensive economic analysis that clearly quantifies the electricity bill savings for each scenario. In the final part of the study, the broader energy potential of wood biomass within the enterprise was evaluated, along with a calculation of the financial profit generated through the production and sale of pellets.

Key words: Industrial-load, Cogeneration, PV, Techno-economic analysis

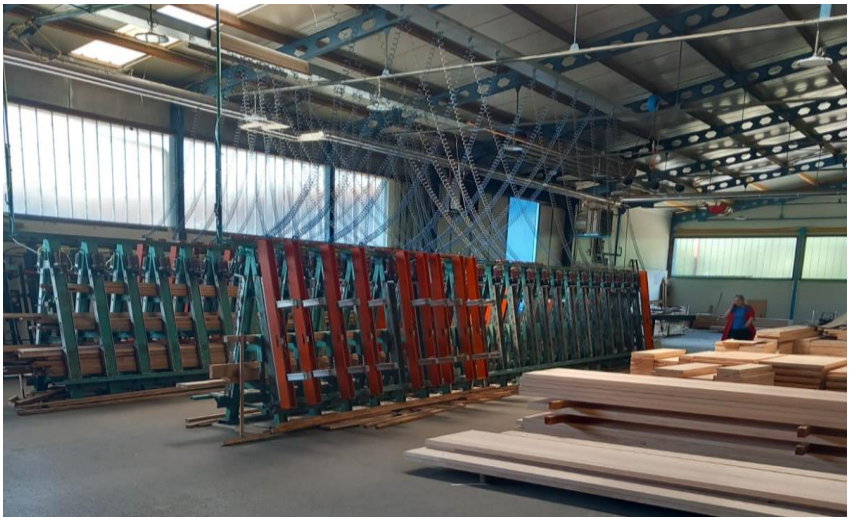
1. Uvod

U industrijskom sektoru je nužno osigurati neprekidno napajanje električnom energijom, što je preduvjet za kvalitetno provođenje proizvodnih procesa i postizanje konkurentnosti na tržištu. Svaki zastoj u napajanju uslijed prekida opskrbe uzrokuje materijalne gubitke ili kašnjenja u rokovima isporuke robe. Kako bi se taj problem riješio, a ujedno postiglo što veće iskorištenje dostupnih resursa u poduzećima, nužno je provesti detaljnu analizu potrošnje električne energije i mogućnosti integracije lokalnih izvora energije. U postrojenjima koja se bave obradom drveta sa integriranim sušionicama drveta, u proizvodnim procesima nastaje značajan višak drvne mase koja se može iskoristiti za proizvodnju električne i/li toplinske energije ili se u drugom slučaju može koristiti za daljnju preradu u vidu peleta i briketa. Korištenje obnovljivih izvora energije, s naglaskom na šumsku biomasu je ujedno korak ka zaštiti okoliša i poticanje gospodarstva i prepoznato je kao prilika za postizanje sigurnog izvora energije [1]. Iskorištavanje biomase za istovremenu proizvodnju toplinske i električne energije je opisano u radu [2]. S obzirom na zahtjeve proizvodnog postrojenja, kogeneracija se nameće kao rješenje koje bi ujedno osiguralo električnu energiju za rad strojeva i toplinsku energiju za potrebe postrojenja za sušenje drveta, a primjenjivana je u različitim industrijskim granama [3], a koje pokazuje veći stupanj korisnosti nego odvojena proizvodnja električne i toplinske energije [4]. Navedene su moguće izvedbe kogeneracijskih ciklusa, učinkovitost i ekonomska isplativost takvih postrojenja. Ekonomska isplativost kogeneracije se mora sagledati sa više aspekata pri čemu se treba uzeti u obzir i cijena ostalih alternativnih izvora energije, kao što su plin ili električna energija [5]. Glavno ograničenje u izgradnji je visoka cijena, a kao alternativa u osiguranju neovisnosti o vanjskoj mreži je fotonaponska elektrana, što je ujedno prihvatljivije rješenje i sa stajališta prostora potrebnog za smještaj elektrane s obzirom na dostupne krovove zgrada. Ovisno o instaliranoj snazi, vlasnici mogu smanjiti troškove električne energije preuzete iz mreže, ali se i otvara prostor za dodatnu zaradu kroz prodaju električne energije [6] uzimajući u obzir stanje distribucijske mreže i njezina ograničenja [8]. Naponske prilike u mreži, pogotovo na kraju radijalnog izvoda mogu biti narušene, odnosno napon može biti izvan granica definiranih standardima kvalitete električne energije. Distribuirani izvori će u tom slučaju pozitivno djelovati, a ukoliko je spojen preko invertera može se djelovati na tokove jalove snage i iznose napona [7], [9], kao i na smanjenje gubitaka snage i rasterećenje vodova [10].

U ovom radu na primjeru poduzeća za obradu drveta i izradu pločastog namještaja je analiziran utjecaj integracije kogeneracijskog postrojenja (sinkronog generatora) i fotonaponske elektrane. Poduzeće je spojeno na srednjenaponsku mrežu koju karakterizira visoko opterećenje vodova i česti prekidi uslijed zastarjele infrastrukture. Osim utjecaja na naponske prilike u mreži i prihoda koji bi se ostvarili prodajom električne energije, napravljena je usporedba prihoda od prodaje peleta iz viška drvne mase. Rad se sastoji od šest poglavlja pri čemu je uvod prvo poglavlje. U drugom poglavlju su dani osnovni podaci o poduzeću i prikazani podaci mjerenja kvalitete električne energije, kao i plaćeni računi za električnu energiju tijekom godine dana. U trećem poglavlju je opisana mreža na koju je spojeno poduzeće i kroz tri scenarija je izvršena analiza naponskih profila i razmjene energije između poduzeća i mreže. U četvrtom poglavlju je provedena ekonomska analiza troškova i ušteda električne energije dok je u petom provedena analiza zarade od prodaje peleta na tržištu. Zaključak je dan šestim poglavljem.

2. Opis postrojenja i problematika rada na mreži

Poduzeće Budo-Export osnovano je 1974. godine te s vremenom postaje veliko poduzeće za izradu ploča, elemenata za masivni namještaj, peleta i briketa (slika 1) čime su vodeći proizvođači u Zeničko-dobojskoj županiji, Bosna i Hercegovina, a većina gotovih proizvoda je namijenjena izvozu u Europsku uniju. Poduzeće se nalazi na dvije bliske lokacije; na jednoj je pilana na kojoj se provodi gruba obrada trupaca, a na drugoj lokaciji, koja je ujedno glavni dio pogona, se proizvodi krajnji proizvod i pelet. Poduzeće Budo-Export napaja se preko tri transformatorske stanice. Pilana se napaja preko transformatorske stanice T16 snage 400 kVA, glavna proizvodnja preko transformatorskih stanica T14 snage 630 kVA i Pilana – Budo Export snage koja je uzeta kao referentna točka za promatranje s obzirom da je preko nje spojen najveći dio tereta. Nazivna snaga TS Pilana je 400 kVA, prijenosni omjer 10000/400/231 V, uk% 4 %, uz mogućnost preklapanja u beznaponskom stanju na SN strani u stupnjevima 2 x ± 2,5%.

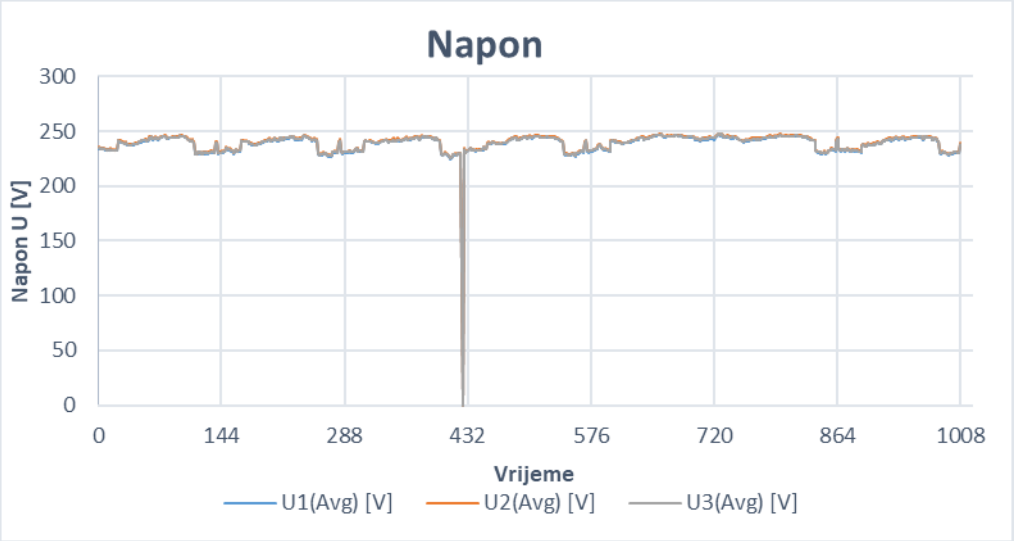


Slika 1. Unutrašnjost poduzeća Budo-Export

Na toj transformatorskoj stanici vršeno je sedmodnevno mjerenje kvalitete uređajem METREL MI2792 Fw11.0.731 (slika 2) uređajem s početkom od 22.10.2024. godine u 12 sati i 9 minuta.

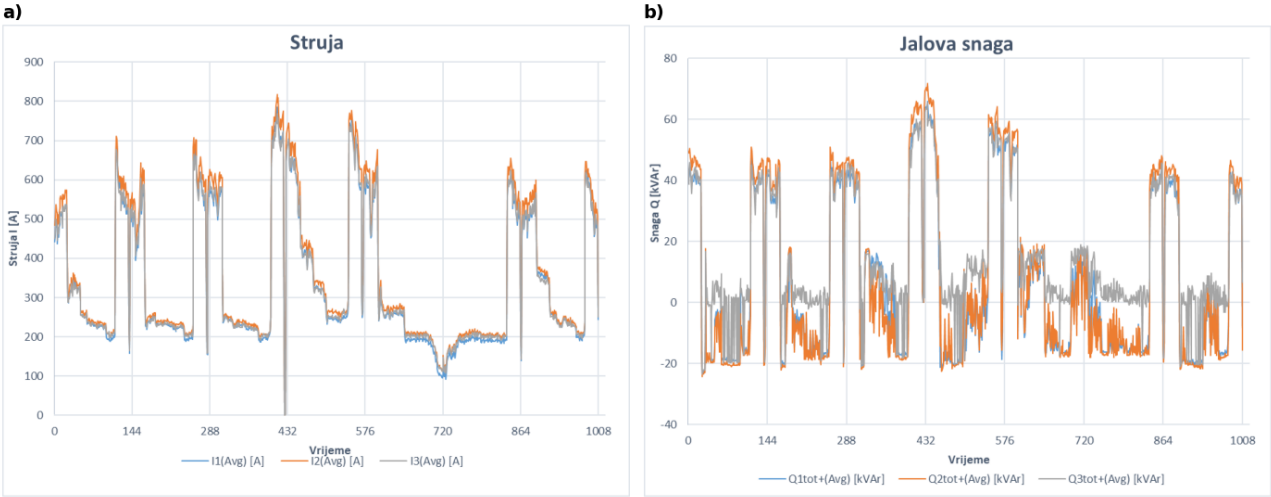
Slika 2. Metrel mjerni uređaj

Uvidom u podatke dobivene izvršenim mjerenjem kvalitete (slika 3) vidljivo je kako je prilikom mjerenja došlo do jednog kratkotrajnog propada i jednog potpunog prekida opskrbe postrojenja koji je trajao nešto više od 27 minuta tijekom kojih je došlo do prekida rada. S obzirom da se radi o staroj i preopterećenoj distribucijskoj mreži, koja prolazi ruralnim šumskim i ponegdje miniranim područjem s otežanom pristupačnošću, prekidi u opskrbi su česti. Posebno su izraženi ljeti zbog zagrijavanja vodova i povećanja provjesa te čestih oluja i zimi zbog dodatnog tereta i neodržavanja mreže. Ovi prekidi opskrbe znaju trajati i po nekoliko dana zbog loše pristupačnosti terena na kojem je potrebno vršiti popravak kvarova. Trenutno je u tijeku zamjena i rekonstrukcija dijela vodova, ali zbog velikog broja vodova, ekonomskih stavki i postojanja dvije nadležne elektroprivrede u tom kraju taj proces je jako spor i zahtjevan.



Slika 3. Podaci mjerenja napona

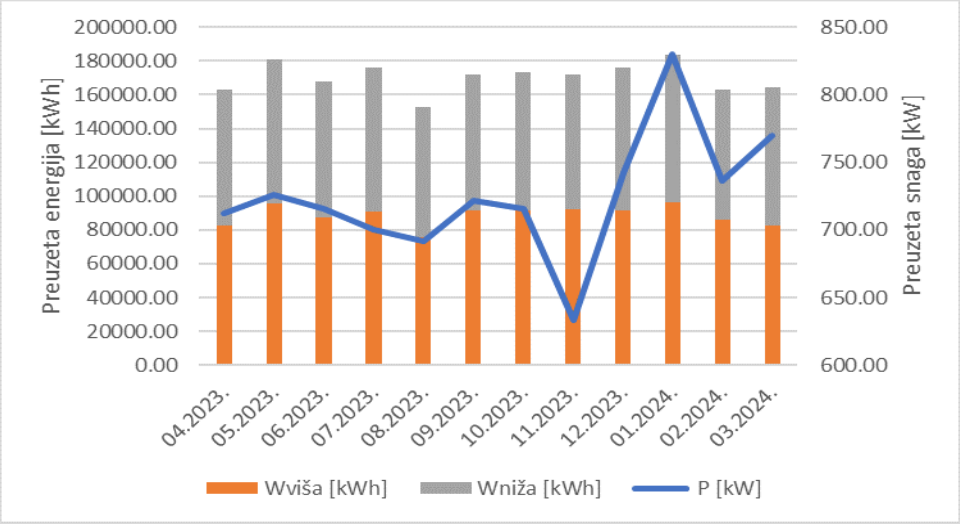
Na slici 4 a) i b). prikazana je srednja vrijednost struje i jalove snage za sve tri faze. Ukupno je očitano 1008 uzoraka. Radi lakšeg razumijevanja prikaza grafovi su podijeljeni na 7 dijelova. Svaki dio počinje u 12 sati i završava sljedeći dan u 12 sati.



Slika 4. Podaci mjerenja a) struje i b) jalove snage

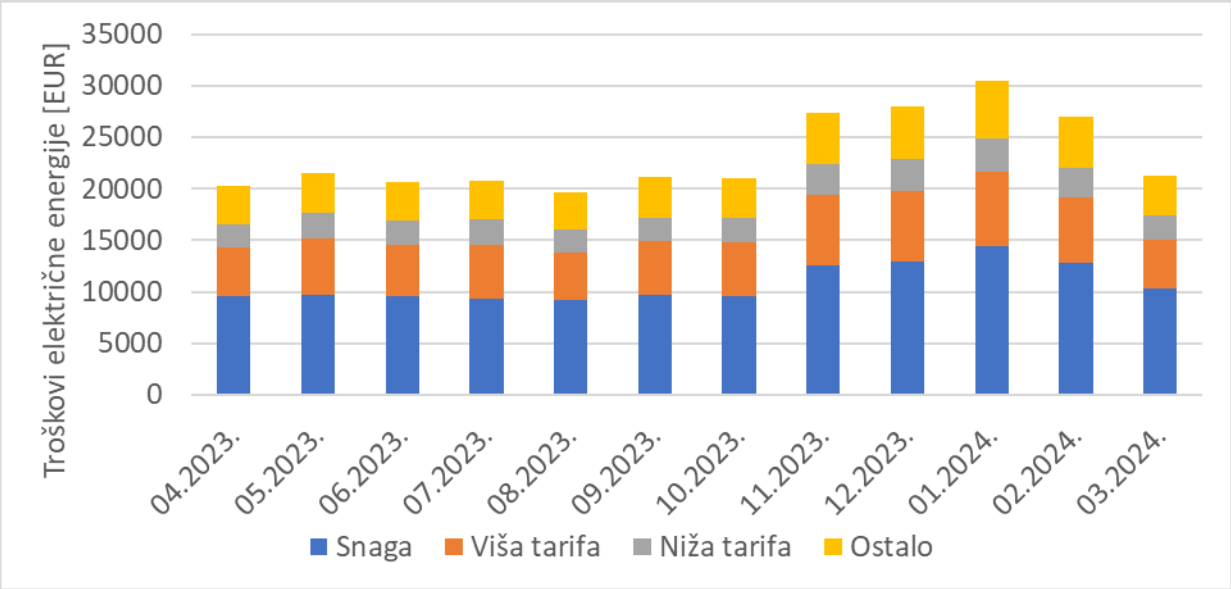
Podaci svih mjerenih veličina ukazuju na dinamiku rada tijekom dana i tjedna. Radi se smjenski, od ponedjeljka do petka uz polusatne pauze. Najviša izmjerena vrijednost struje je 817,19 A u fazi L2 dok je najniža izmjerena vrijednost iznosila 92,69 A u fazi L1. Za razliku od grafa napona na grafu struja uočljivo je kako vrijednost struje u fazi L2 ima blago povišen iznos u odnosu na struje u fazama L1 i L3 koje su relativno sličnih iznosa. Osim podataka sedmodnevnog mjerenja kvalitete na slikama dostupni su podaci iz računa za razdoblje od četvrtog mjeseca 2023. godine do trećeg mjeseca 2024. godine, a prikazani su slikom 5. Za svaki mjesec prikazana je potrošnja angažirane snage u doba više tarife te potrošnja radne energije po višem i nižem dnevnom tarifnom sustavu. Preuzimanje jalove energije naplaćuje se samo u slučaju kada je prekomjerno preuzeta. U ovom slučaju do prekomjernog preuzimanja došlo je u desetom mjesecu 2023. godine. Sve cijene prikazane su bez PDV-

a koji u Bosni i Hercegovini iznosi 17 %. Prilikom pretvorbe cijena iz KM u € korišten je tečaj 1 KM = 0,5118 € [11].



Slika 5. Podaci o potrošnji snage i energije u višoj i nižoj tarifi

S obzirom na dinamiku rada u višem dnevnom tarifnom sustavu veća je potrošnja energije. Obzirom da je u zimskim mjesecima viša jedinična cijena samim tim su i računi znatno veći, a ukupne cijene plaćene energije po višoj i nižoj tarifi su prikazane slikom 6.



Slika 6. Cijena električne energije tijekom godine dana

2.1. Ekonomski aspekt analize rada postrojenja

Tehno-ekonomska analiza provodi se na temelju dostupnih rezultata dobivenih simulacijom. Za razmatrane scenarije određuje se ukupna energija preuzeta iz mreže W_{uk} te se oduzima fiksna energija ostalih potrošača W_F kako bi se dobila energija W_{BE} koju u svakom trenutku troši poduzeće:

$$W_{BE} = W_{uk} - W_F \tag{1-1}$$

Za izračun postotne potrošnje energije za višu $K_{VT\%}$ i nižu $K_{NT\%}$ tarifu korišteni su izrazi (1-2) i (1-3).

$$K_{VT\%} = \frac{\sum W_{BE,VT}}{\sum W_{BE}} \cdot 100 \quad (1\text{-}2)$$

$$K_{NT\%} = \frac{\sum W_{BE,NT}}{\sum W_{BE}} \cdot 100 \quad (1\text{-}3)$$

gdje je $K_{VT\%}$ i $K_{NT\%}$ energija koja je u jednom danu potrebna tijekom više (niže) tarife [%], $\Sigma W_{BE,VT}$ i $W_{BE,NT}$ suma energija koje su potrebne po satima tijekom više (niže) tarife [kWh], ΣW_{BE} ukupna energija koja je potrebna unutar jednog dana [kWh]. Iz ukupne energije se mogu odrediti udjeli energije za ljetno i zimsko računanje vremena i višu W_{VT} i nižu W_{NT}tarifu prema izrazu (1-4):

$$W_{VT(NT)} = W_{BE} \cdot K_{VT(NT)\%} \quad (1\text{-}4)$$

Cijena za višu i nižu tarifu se računa prema (1-5) kao umnožak energije pripadne tarife i za dio godine i jedinične cijene električne energije C_1 za razmatranu tarifu i dio godine

$$Cijena\ VT(NT)_{ljeto(zima)} = W_{VT(NT)} \cdot C_1 \quad (1\text{-}5)$$

Prema izrazu (1-6) izvršen je izračun energije sadržane u količini biomase koja je ekvivalentna dnevnoj proizvodnji peleta.

$$E_b = m \cdot Q \quad (1\text{-}6)$$

gdje je E_b energija sadržana u biomasi [kWh], *m* je ukupna masa biomase koja je dostupna za sagorijevanje u jednom danu [kg], *Q* specifična energija drvne mase (donja toplinska moć biomase) označava koliko se energije može dobiti sagorijevanjem jedne jedinice drvne mase, za suhu drvnu masu obično iznosi oko 4,0 – 4,5 kWh/kg [kWh/kg].

Za izračun potencijalne proizvedene električne energije u kogeneracijskom postrojenju potrebno je uzeti u obzir učinkovitost samog postrojenja. Učinkovitost postrojenja (η) ovisi o vrsti tehnologije i snazi sustava, ona obično iznosi oko 10 – 30 %. Izračun je izvršen prema izrazu (1-7), [12]:

$$E_{el} = E_b \cdot \eta \quad (1\text{-}7)$$

Za izračun dnevnih prihoda od proizvedenog peleta Z_p korišten je izraz (1-8) dok je za izračun dnevne potrebne energije za proizvodnju peleta W_p korišten izraz (1-9).

$$Z_p = količina\ peleta\ [t] \cdot jedinična\ cijena \quad (1\text{-}8)$$

$$W_p = P_{motora} \cdot t \quad (1\text{-}9)$$

gdje je P_{motora} snaga motora koji pokreće stroj za proizvodnju peleta u kW, *t* vrijeme rada motora koji pokreće stroj za proizvodnju peleta u satu. Niže je izrazom (1-10) prikazana usporedba mjesečnih prihoda proizvedenog peleta i električne energije proizvedene kogeneracijom kao umnožak prihoda Z_p i n (broja radnih dana u mjesecu)

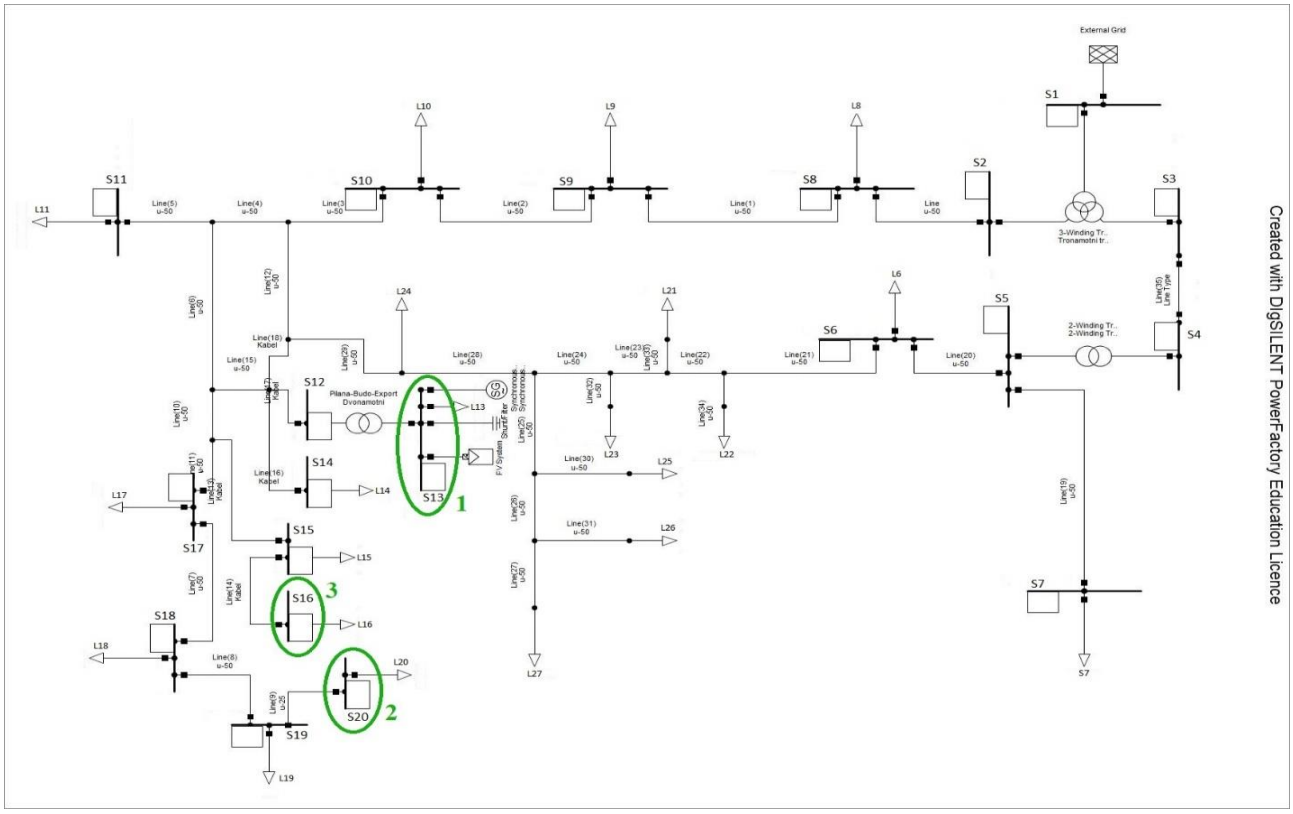
$$Mjesečna\ zarada\ peleta = Z_p \cdot n \quad (1\text{-}10)$$

Jedinične cijene električne energije za krajnje kupce koji spadaju pod grupu industrijskih potrošača izravno ugovaraju cijenu pod uvjetima tržišne opskrbe električnom energijom [13], a to se izravno dogovara sa Javnim poduzećem „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar dok se cijena otkupa definira prema referentnim cijenama hrvatske burze CROPEX u mjesecu u kojem se vrši otkup električne energije [14]. Dodatna specifičnost ekonomskog aspekta je raspored više i niže tarife tijekom dana. U razdoblju od 1. ožujka do 31. listopada za obračun utrošene električne energije primjenjuje se niža (ljetna) tarifa. Tijekom ljetnog računanja vremena viša dnevna tarifa primjenjuje se od 08:00 do 14:00 sati i od 17:00 do 23:00 sati, a

niža dnevna tarifa od 23:00 do 08:00 sati i od 14:00 do 17:00 sati, te nedjeljom. Tijekom zimskog računanja vremena viša dnevna tarifa primjenjuje se od 07:00 do 13:00 sati i od 16:00 do 22:00 sati, a niža dnevna tarifa primjenjuje se od 22:00 do 07:00 sati i od 13:00 do 16:00 sati, te nedjeljom.

3. Integracija kogeneracijskog postrojenja i fotonaponskog sustava

Na slici 7 prikazana je modulirana mreža koja se sastoji od 3 transformatora (dva dvonamotna i jedan tronamotni), 21 tereta, 39 sabirnica, vanjske mreže, 35 vodova te u kasnijim simulacijama integrirani su sinkroni generator i fotonapon snage 400 kW. S obzirom na veliki broj motora u poduzeću nužno je provesti kompenzaciju statičkim kompenzatorom snage 0,63 MVAr. Prilikom svake simulacije promatrani su naponi na sabirnicama S13 i S20. Napon na sabirnici S13 (zaokružena i označena brojem 1) promatran je jer je tu prisutna glavna potrošnja postrojenja te je na tu sabirnicu dodavana kompenzacija, sinkroni generator i fotonapon. Sabirnica S20 (zaokružena i označena brojem 2) promatrana je jer je najudaljenija, krajnja sabirnica u mreži. Na lokaciji označenoj brojem 3 je pilana, ali s obzirom na malu udaljenost od glavne proizvodnje, neće se razmatrati u analizi. Osim napona prikazana je i energija u mreži kako bi se mogla izvršiti ekonomska analiza. Potrošači na lokaciji postrojenja modelirani su prema karakteristici dobivenoj mjerenjem dok su svi ostali pretpostavljeni kao potrošači konstantne snage. Detaljnija analiza i dodatni podaci o mreži i potrošačima su dostupni u radu [15], a sve simulacije su napravljene u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory 2022 [16].

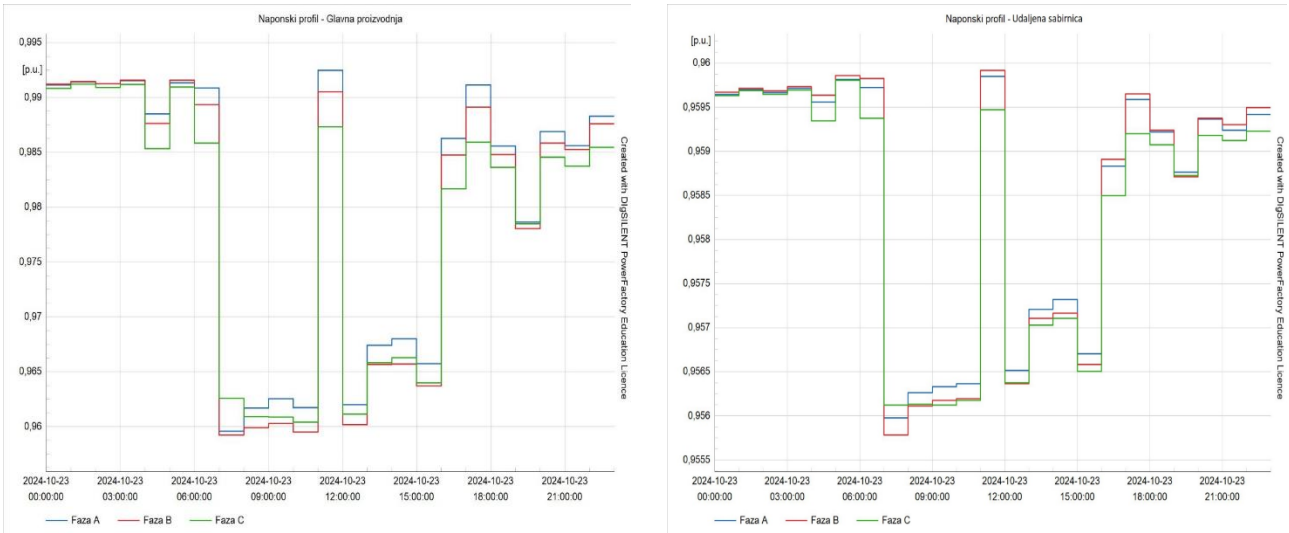


Slika 7. Shema distribucijske mreže

U radu se razmatraju sljedeći scenariji:
S1 - osnovni scenarij: Na temelju podataka mjerenja kvalitete električne energije analiziraju se naponske prilike u mreži i preuzeta energija iz distribucijske mreže. Rezultati su prikazani grafički.
S2 - integracija kogeneracije: Na lokaciji glavne proizvodnje (industrijskog potrošača) je integriran sinkroni generator snage 400 kW. Naponski profili i razmjena energije s mrežom je prikazana grafički i uspoređena s osnovnim scenarijem.
S3 - integracija PV: Sinkroni generator je zamijenjen fotonaponskom elektranom snage 400 kW i analizira se proizvodnja elektrane za ljetno i zimsko razdoblje, a dobiveni rezultati su uspoređeni sa scenarijima 1 i 2.

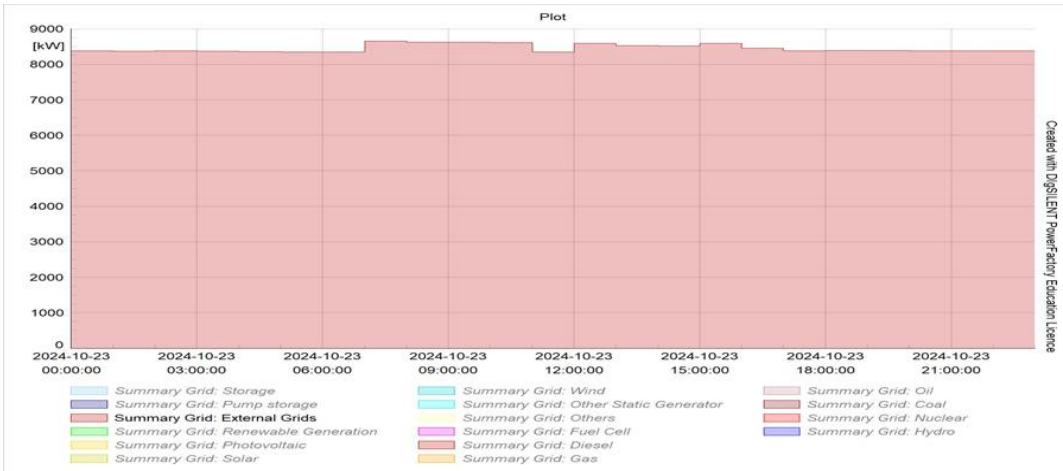
3.1. Scenarij 1 - Osnovni scenarij

U osnovnom scenariju se razmatra rad poduzeća bez integriranih obnovljivih izvora energije. Napon je unutar dozvoljenih granica, no i dalje je uočljiv pad napona u vremenskom periodu kada poduzeće radi i prikazan je slikom 8 a). Najniži napon je u fazi B i iznosi 0.958 p.u. u 8 ujutro. U isto vrijeme napon faze A iznosi 0.959, a faze C 0.963 p.u. Najviši napon je tijekom noći i u tom trenutku su opterećenja svih faza skoro jednaka. Iz obrasca se uočava povećanje napona u razdoblju između 12 i 13 sati zbog popodnevne pauze. Dnevni naponski profil udaljene sabirnice, prikazan slikom 8 b), identičan je profilu napona na sabirnici kod postrojenja uslijed načina modeliranja potrošača. Razlika je u znatno nižim vrijednostima napona, koje za fazu B iznose 0.9557 p.u., fazu A 0.9559 p.u. te 0.9561 p.u. u fazi C.



Slika 8. Napon sabirnice a) S13 i b) udaljene sabirnice (S20), Scenarij 1

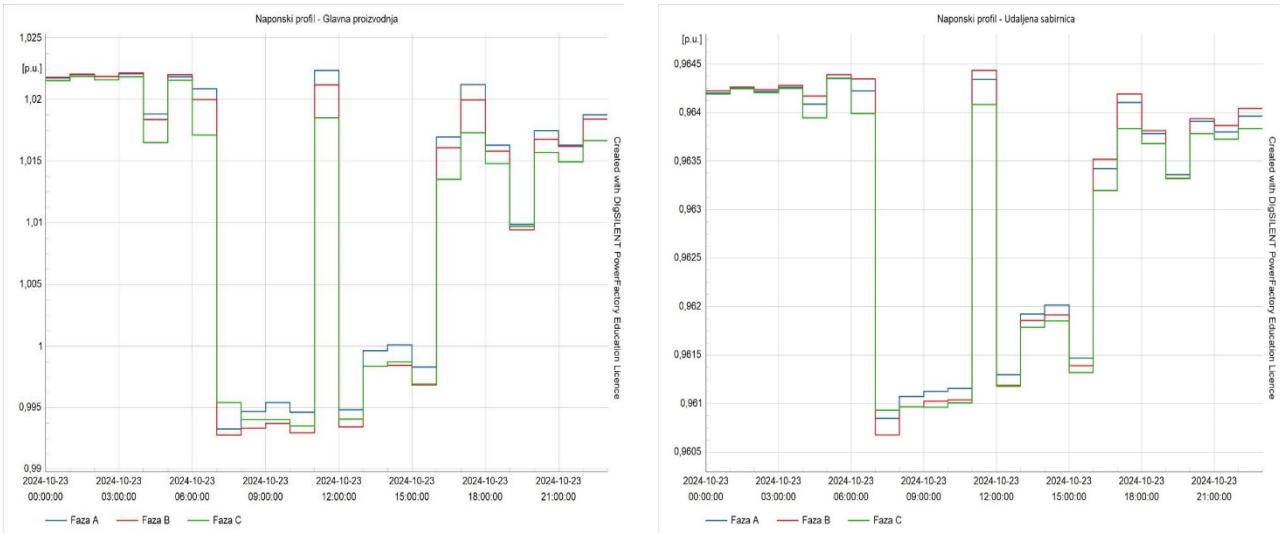
Slikom 9 prikazana je razmjena energije. Ukupna energija u iznosu 202 781,58 kWh preuzeta je iz mreže s obzirom da nema nikakvog distribuiranog izvora. Vrijednosti energije kreću se u rasponu između 8 350 i 8 656 kWh, a vršne vrijednosti definira potrošnja tereta L13. Minimalan iznos energije preuzet je u 05:00 sati (u 11:00 je preuzet samo jedan kWh više) dok je maksimalan iznos energije preuzet u 07:00 sati.



Slika 9. Razmjena energije u mreži, Scenarij 1

3.2. Scenarij 2 - Integracija sinkronog generatora snage 400 kW

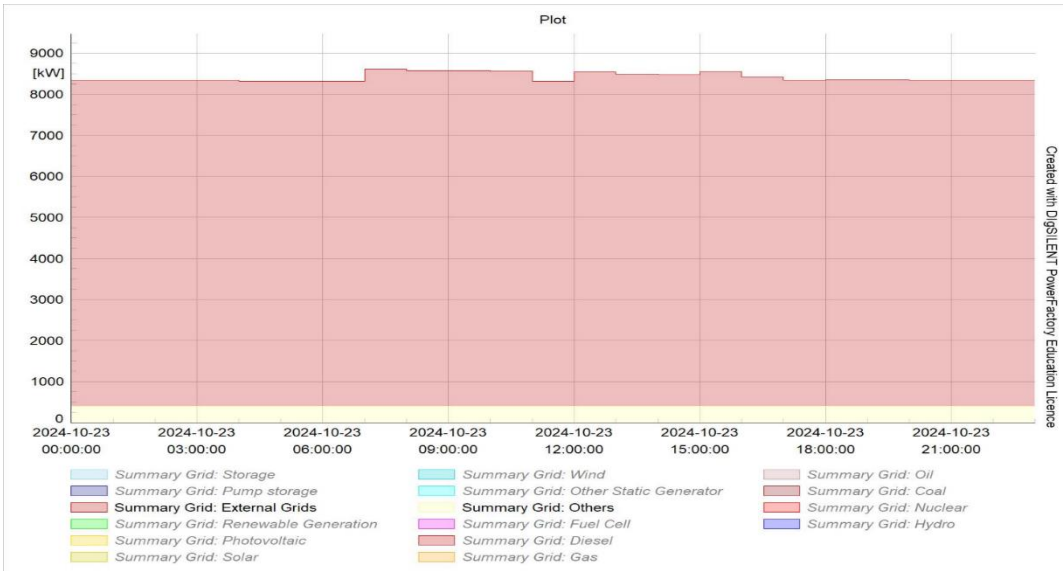
S obzirom na dostupnost viška drvne mase na lokaciji poduzeća te izazovima u sigurnosti opskrbe električnom energijom, u scenariju 2 se razmatra ugradnja sinkronog generatora snage 400 kW kao dijela kogeneracijskog poduzeća. Toplinska energija bi se u tom slučaju koristila za potrebe sušionice drveta tijekom cijele godine, odnosno grijanje prostora zimi. Integracijom sinkronog generatora se mijenjaju naponi na sabirnicama S13 (slika 10a) i S20 (slika 10b). Nakon dodavanja sinkronog generatora napon dostiže vrijednosti u rasponu između 1,023 i 0,993 p.u. U odnosu na prethodni slučaj na sabirnici S20 se cjelokupni iznos napona povećao za 0,05 p.u.



Slika 10. Napon sabirnice a) S13 i b) udaljene sabirnice (S20), Scenarij 2

Na slici 11 prikazana je ukupna energija u mreži koja se uzima za napajanje svih tereta. Minimalni iznosi energije preuzeti su u 05:00 sati i 11:00 sati, a iznosili su po 8 317 kWh, dok je maksimalan iznos energije preuzet u 07:00 sati i iznosi 8 610 kWh. Ukupna preuzeta

energija u mreži iznosi 201 877,56 kWh što je smanjenje od 904 kWh u odnosu na osnovni scenarij.



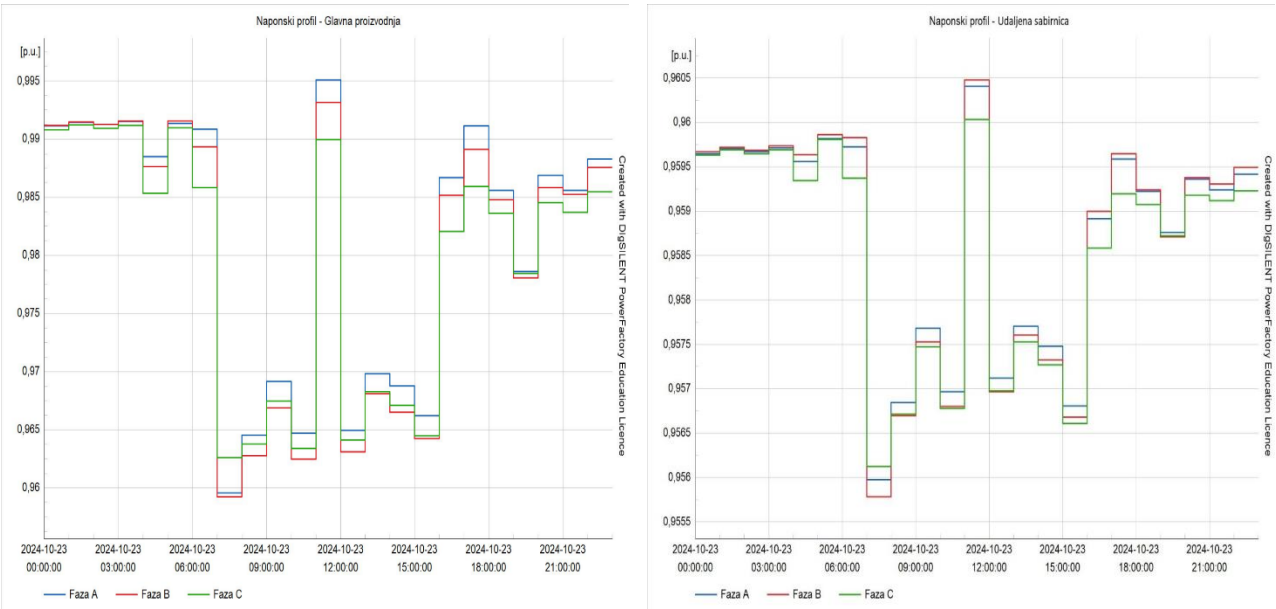
Slika 11. Razmjena energije u mreži, Scenarij 2

3.3. Scenarij 3 - Integracija fotonaponske elektrane snage 400 kW

Unatoč dostupnosti energenata, izgradnja kogeneracijskog postrojenja je značajna investicija koja ujedno zahtijeva veliku površinu za smještaj. Druga razmatrana opcija je integracija fotonaponske elektrane koja bi bila postavljena na krov poduzeća te time ne bi ograničila buduće širenje poslovnih zgrada. Za razliku od kogeneracije kojom se dobije konstantna proizvodnja tijekom dana, fotonaponska elektrana će proizvoditi energiju ovisno o dijelu godine i dana. S obzirom da je glavni dio proizvodnje organiziran tijekom dana, proizvodnja i potrošnja energije će se u većem dijelu podudarati. Zbog toga se razmatraju dva slučaja: proizvodnja tijekom ljetnog i zimskog dana. Proizvodnja elektrane je modelirana prema stvarnim podacima dobivenim mjerenjima proizvodnje elektrane na lokaciji u Slavoniji, a s obzirom da proizvodnja ovisi o Sunčevom zračenju, isti se profil može pretpostaviti i za modeliranje elektrane na lokaciji poduzeća.

3.3.1 Scenarija 3a - Integracija fotonaponske elektrane snage 400 kW tijekom zimskog perioda

Proizvodnja elektrane ovisiti će o Sunčevom zračenju. S obzirom na trajanje dana fotonaponska elektrana će proizvoditi energiju u periodu između 08:00 i 16:00 sati. Naponski profil (slika 12) se ne mijenja značajno u odnosu na osnovni scenarij, a tijekom dana dolazi do malog povišenja napona u iznosu 0,002 p.u. Razlika na udaljenoj sabirnici S20 je još i manja i povećanje napona iznosi 0,0006 p.u. U odnosu na veličinu sustava ta promjena je zanemariva.



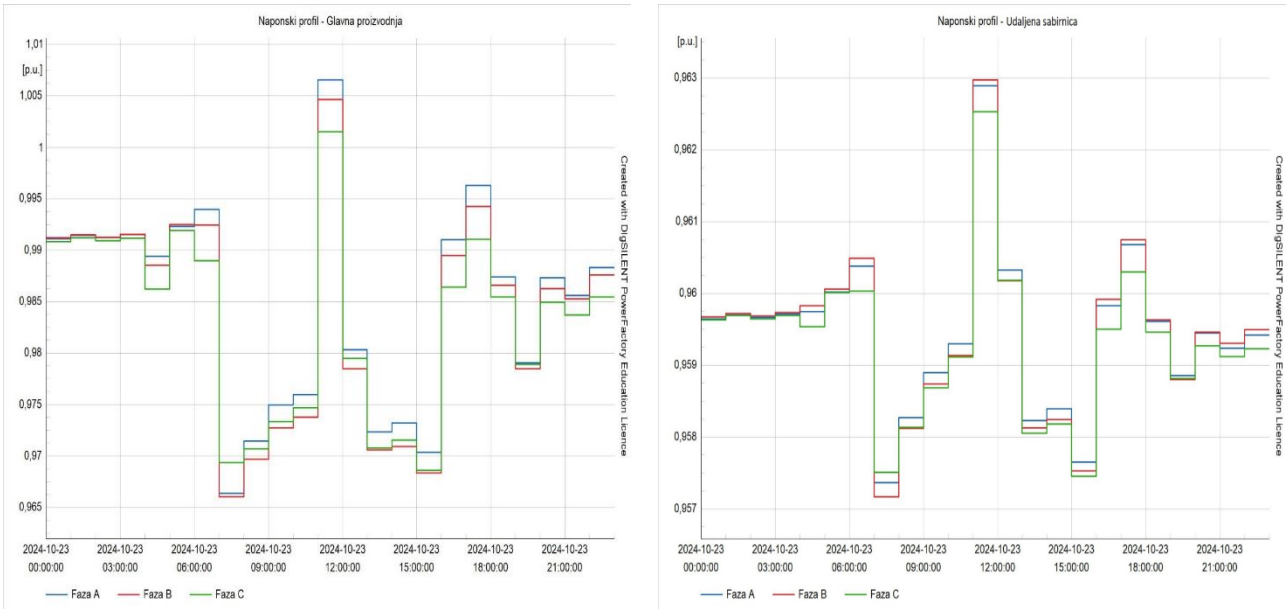
Slika 12. Napon sabirnice a) S13 i b) udaljene sabirnice (S20), Scenarij 3a

Na slici 13 prikazana je ukupna energija u mreži koja se uzima za napajanje svih tereta. Minimalan iznos energije preuzet je u 11:00 sati, a iznosi 8 345 kWh dok je maksimalan iznos energije preuzet u 07:00 sati i iznosi 8 656 kWh. Ukupna preuzeta energija u mreži iznosi 202 724,95 kWh, a ukupna proizvodnja fotonaponske elektrane za sunčani zimski dan iznosi 459,15 kWh.

Slika 13. Razmjena energije u mreži, Scenarij 3a

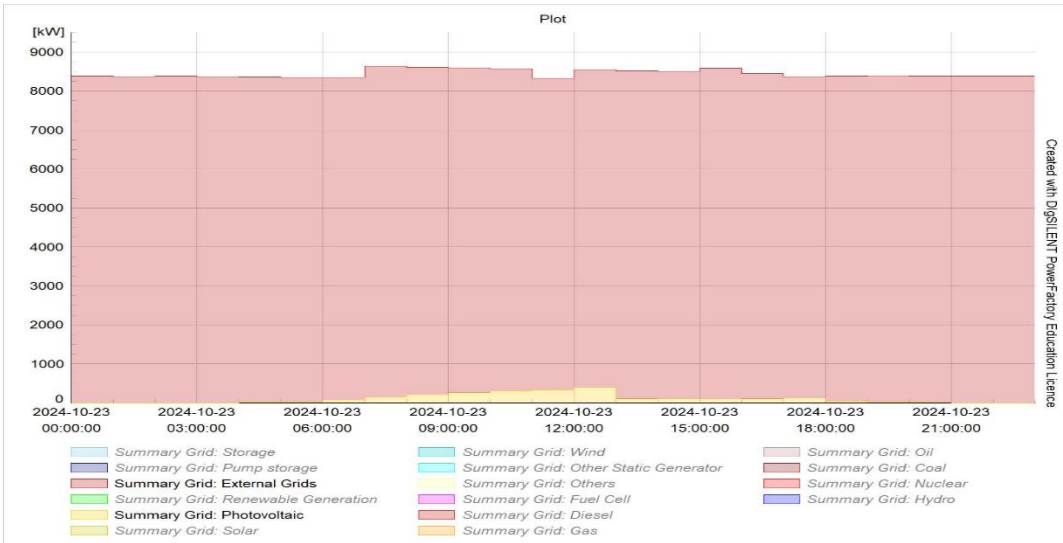
3.3.2 Scenarij 3b - Integracija fotonaponske elektrane snage 400 kW tijekom ljetnog perioda

Tijekom ljeta se proizvodnja fotonaponske elektrane povećava jer se električna energija proizvodi u vremenskom periodu između 04:00 i 20:00 sati. Napon sabirnice S13 se povećao za 0,012 p.u. u odnosu na osnovni scenarij, slika 1.16. Na sabirnici S20 u vremenskom periodu od 04:00 do 20:00 sati došlo je do porasta napona od 0,0031 p.u.



Slika 14. Napon sabirnice a) S13 i b) udaljene sabirnice (S20), Scenarij 3b

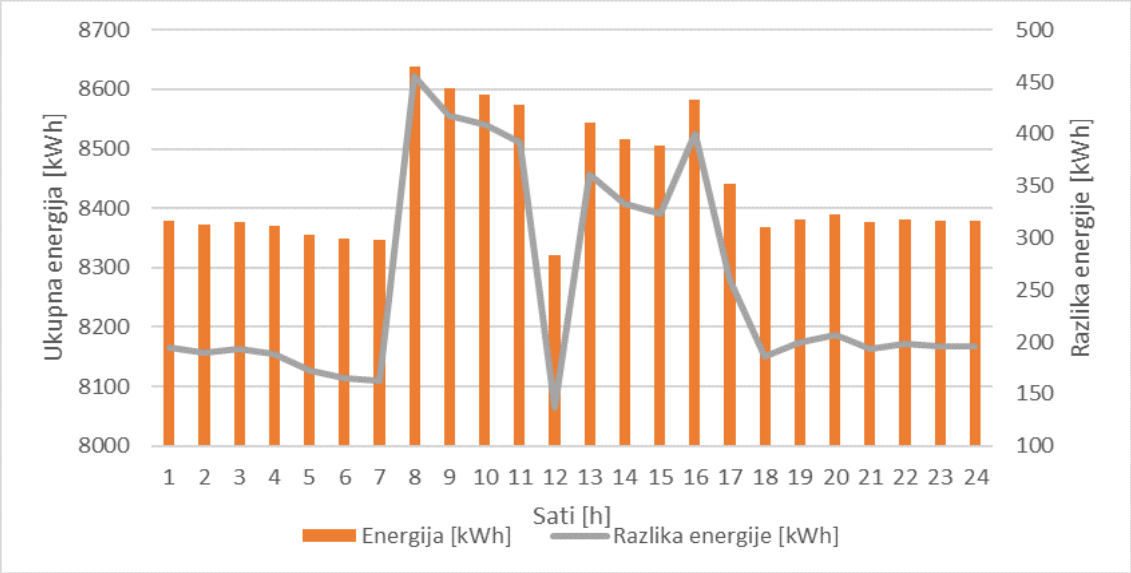
Ukupna preuzeta energija je prikazana slikom 15. Minimalni iznos energije preuzet je u 11:00 sati i iznosi 8 320 kWh, dok je maksimalni u 07:00 s iznosom 8 638 kWh. Preuzeto je 202 519, 49 kWh uz proizvodnju elektrane od 2 337,70 kWh.



Slika 15. Razmjena energije u mreži, Scenarij 3b

4. Ekonomska analiza

Ekonomska analiza se provodi prema scenariju sa integriranom fotonaponskom elektranom i proizvodnju tijekom ljeta. Fiksna energija za svaki sat uključuje potrošnju energije svih potrošača i gubitke u sustavu te iznosi 8 183 kWh za svaki sat što je u toku dana 196 392 kWh. Energija potrošena unutar poduzeća Budo Export je prikazana slikom 16, a računa se prema izrazu (1-1). Ukupna energija iznosi 202 520 kWh, te je time razlika 6 128 kWh za 24-satni period. S obzirom na tarifni sustav, tijekom više tarife je potrošnja 3 229 kWh, dok je tijekom niže 2 899 kWh.



Slika 16. Energija po satu

Prema izrazima (1-1) i (1-3) se mogu odrediti udjeli energije potrošene tijekom više i niže tarife:

$$W_{BE,VT\%} = \frac{3\,229}{6\,128} \cdot 100 = 52{,}69\ \%$$

$$W_{BE,NT\%} = \frac{2\,899}{6\,128} \cdot 100 = 47{,}31\ \%$$

Ovaj omjer za zimski period se razlikuje budući da se mijenja vremenski raspon za tarife. Usporedbe radi, zimi bi omjer potrošnje bio 55,71% za višu tarifu prema 44,29% za nižu tarifu. Ova razlika se pojavljuje i zbog toga što je vršna potrošnja ujutro od 07 sati kada poduzeće počinje s radom i pokreću se svi strojevi. Novčani tokovi i utrošena energija po višoj i nižoj tarifi se računaju prema izrazima (1-4)-(1-5) iz čega se dobiju cijene energije. Za ljetnu tarifu je potrošnja energije u višoj tarifi

$$W_{VT_{ljeto}} = 6\,128 \cdot 0{,}5269 = 3\,228{,}84\ kWh,$$

a u nižoj

$$W_{NT_{ljeto}} = 6\,128 \cdot 0{,}4731 = 2\,899{,}16\ kWh.$$

Za zimsku tarifu su ti iznosi

$$W_{VT_{zima}} = 6\,128 \cdot 0{,}5571 = 3\,413{,}91\ kWh$$

i

$$W_{NT_{zima}} = 6\,128 \cdot 0{,}4429 = 2\,714{,}09\ kWh.$$

Prema tarifnom sustavu, cijena energije po višoj ljetnoj tarifi je

$$Cijena\ VT_{ljeto} = 3\,228{,}84 \cdot 0{,}1118 = 360{,}98\ KM \approx 184{,}73\ €$$

i nižoj

$$Cijena\ NT_{ljeto} = 3\,228{,}84 \cdot 0{,}0559 = 180{,}48\ KM \approx 92{,}36\ €$$

Za zimsku tarifu su iznosi

$$Cijena\ VT_{zima} = 3\,413{,}91 \cdot 0{,}1454 = 497{,}25\ KM \approx 254{,}34\ €$$

$$Cijena\ NT_{zima} = 2\,714{,}09 \cdot 0{,}0727 = 197{,}31\ KM \approx 100{,}97\ €.$$

Ove vrijednosti se odnose na jedan dan. Cijene su izračunate u konvertibilnim markama i pretvorene u eure po tečaju na dan 25.6.2026 godine: 1 KM = 0,5118 €. Ukupni iznosi

potrošnje energije su prikazani tablicom 1. Gornje vrijednosti se odnose na dnevne vrijednosti, a vrijednosti ispod su mjesečne. Integracijom elektrana smanjuje se iznos energije preuzet iz mreže, a najveće smanjenje je tijekom ljetnog perioda (između 26 kWh i 138 kWh) ovisno o tarifnom sustavu. S obzirom na konstantnu proizvodnju, integracija sinkronog generatora u sklopu kogeneracije rezultira najvećim smanjenjem potrošnje energije iz mreže.

Tablica 1. Dnevna i mjesečna potrošnja energije

	Tarifa	Osnovni scenarij	SG	FN zimi	FN ljeti
Ljeto	VT [kWh]	3 366,67 87 533,41	2 890,34 75 148,88	–	3 228,57 83 942,94
	NT [kWh]	3 022,91 78 595,67	2 595,22 67 475,68	–	2 996,12 75 371,80
Zima	VT [kWh]	3 559,64 92 550,51	3 056,01 79 456,14	3 528,09 88 754,24	–
	NT [kWh]	2 829,94 73 578,57	2 429,55 63 168,42	2 804,86 72 926,45	–

Iz podataka o energiji mogu se odrediti iznosi potrošene radne energije po višoj i nižoj tarifi. Prilikom ljetnog računanja vremena srednja vrijednost potrošene radne energije pri višoj tarifi iznosi 87 708 kWh, a pri nižoj iznosi 81 684 kWh dok prilikom zimskog računanja vremena srednja vrijednost potrošene radne energije pri višoj tarifi iznosi 91 572 kWh, a pri nižoj iznosi 82 086 kWh. Uz pretpostavku da je mjesečno 26 radnih dana dobije se mjesečna potrošnja energije. Zbog različitog opsega posla i razlike u broju radnih dana ove vrijednosti mogu odstupati. U tablici 2 prikazane su dnevne i mjesečne cijene za potrošenu električnu energiju. Usporedbom dnevnih cijena vidljiva je proporcionalna raspodjela između sustava kao što je i kod potrošnje energije. Jedina razlika je u omjeru cijena unutar svakog pojedinog sustava zbog značajnih razlika u cijenama među tarifama. Gornja vrijednost je izražena u konvertibilnim markama (KM), dok je donja vrijednost u eurima (€).

Tablica 2. Dnevna i mjesečna cijena potrošene električne energije

		Dnevna cijena KM (€)				Mjesečna cijena KM (€)			
		S1	SG	FN zimi	FN ljeti	S1	SG	FN zimi	FN ljeti
Ljeto	VT	376,39 *192,64*	323,14 *165,38*	–	360,96 *184,74*	9 786,24 *5 008,60*	8 401,65 *4 299,96*	–	9 384,82 *4 803,15*
	NT	168,98 *86,48*	145,07 *74,25*	–	162,05 *82,94*	4 393,50 *2 248,59*	3 771,89 *1 930,45*	–	4 213,28 *2 156,36*
Zima	VT	517,57 *264,89*	444,34 *227,42*	512,98 *262,55*	–	13 456,84 *6 887,21*	11 552,92 *5 912,79*	13 337,58 *6 826,17*	–
	NT	205,74 *105,30*	176,63 *90,40*	203,91 *104,36*	–	5 349,16 *2 737,7*	4 592,34 *2 350,36*	5 301,75 *2 625,41*	–

Usporedbom vrijednosti unutar tablice 2 mjesečne cjenovne uštede u odnosu na osnovni slučaj iznose:

- Integracijom sinkronog generatora snage 400 kW za ljetno računanje vremena viša tarifa 1 384 KM (708,64 €), niža tarifa 621,61 KM (318,14 €) za zimsko računanje vremena viša tarifa 1 903,92 KM (974,42 €), niža tarifa 756,82 KM (387,34 €) - ukupno 4 666,35 KM (2 388,54 €) godišnje

● Integracijom fotonaponske elektrane snage 400 kW za ljetno računanje vremena viša tarifa 401,42 KM (205,45 €), niža tarifa 180,22 KM (92,24 €) za zimsko računanje vremena viša tarifa 119,26 KM (61,04 €), niža tarifa 47,41 KM (24,26 €) - ukupno 748,31 KM (382,99 €) godišnje.

Integracijom sinkronog generatora u sklopu kogeneracijskog postrojenja godišnja ušteda energije iznosi skoro 2 400 €, što je skoro šesterostruko više u odnosu na integraciju fotonaponske elektrane. Sa stajališta poduzeća se povećava i sigurnost opskrbe električnom energijom, poboljšavaju se naponske prilike u okolnoj mreži, pogotovo kad se uzme u obzir starost distribucijske mreže i njezina preopterećenost. Međutim, početni troškovi ulaganja su značajni što predstavlja ograničenje mogućem proširenju. Fotonaponska elektrana pak pored pozitivnog utjecaja na mrežu ima najveću proizvodnju koja se podudara sa najvećim opterećenjem unutar poduzeća uz značajno niže investicijske troškove.

5. Proizvodnja energije iz drvnog otpada i pelet

S obzirom na dostupnost drvne mase i blizinu ostalih poduzeća koja se bave obradom drveta, provesti će se analiza usporedbe proizvodnje električne energije i peleta. Pelet se proizvodi na stroju čiji je motor snage 160 kWh i *cosφ* 0,88. Proizvodnja traje oko 18 sati dnevno šest sati tjedno, a u jednom satu obradi oko 1,3 tone piljevine što rezultira sa približno istom količinom peleta. Piljevina koja ulazi u stroj sadrži 9,5 % vlage dok pelet sadrži 4 % vlage. Dnevna proizvodnja je oko 24 tone peleta (624 tone mjesečno). Poduzeće Budo Export proizvodi 100 % bukov pelet A1 kvalitete čija je cijena oko 400 KM po toni (204,72 €). Prema izrazu (1-6) se dobije ukupna dnevna potrošnja od 100 800 kWh, a uz učinkovitost od 0,20 prema (1-7) proizvede se 20 160 kWh električne energije. Dnevni prihodi od proizvedenog peleta se računaju prema izrazima (1-8) i iznose

$$Cijena = 24 \cdot 400 = 9\,600\ KM \approx 4\,913{,}28\ €$$

uz potrošnju energije računatu prema izrazu (1-9)

$$W_P = 160 \cdot 18{,}5 = 2\,960\ [\text{kWh}],$$

Dok je ukupna mjesečna zarada

$$Mjesečna\ zarada\ peleta = 9\,600 \cdot 26 = 249\,600\ KM\ (127\,745{,}28\ €).$$

Iz mjesečnih računa i rezultata simulacije može se napraviti usporedba potrošnje/proizvodnje električne energije poduzeća. Prema računima, prikazanim slikama 5 i 6, prikazani su potrošnja električne energije u kWh i troškovi električne energije po mjesecima za višu i nižu tarifu. Iz toga se prema stvarnim računima dobije ukupna potrošnja energije u iznosu 170 814 kWh. Simulacijom se pokazuje kako bi proizvodnja u kogeneracijskom postrojenju iznosila 524 160 kWh pri čemu bi se nadležnoj elektroprivredi prodavala razlika od 353 346 kWh. Prema okvirnom proračunu za satne vrijednosti zarada bi iznosila 26 334,87 €, odnosno za srednje cijene mjesečnih računa 22 385,84 €, odnosno prodaje proizvedenog viška električne energije dobije se iznos od 48 720,71 €. Usporedbom dobivenih cijena vidljivo je kako poduzeće ima značajno veći profit od proizvodnje peleta nego od kogeneracijskog postrojenja, a kompromis koji bi osigurao neovisnost o vanjskoj mreži u slučaju prekida je proizvodnja električne energije od dijela drvne mase te peleta od ostatka.

6. Zaključak

Industrijski potrošači imaju stroge zahtjeve po pitanju kvalitete električne energije i neprekidne opskrbe. Svaki zastoj uslijed prekida opskrbe električnom energijom rezultirati će kašnjenjem proizvodnje i financijskim gubicima. Za poduzeća spojena na ruralnu, jako opterećenu mrežu je nužno osigurati dodatni izvor napajanja za slučaje prekida ili naponskih propada. U radu je na primjeru poduzeća koje se bavi obradom drveta analizirana mogućnost integracije kogeneracijskog postrojenja na drvne ostatke, čime bi se osigurala proizvodnja električne i toplinske energije na mjestu potrošnje. Iako se time postignu željena poboljšanja naponskih profila, zbog visokih investicijskih troškova se razmatra i druga opcija, a to je ugradnja fotonaponske elektrane. Uvidom u vrijednosti cjenovne uštede koja iznosi skoro 2 400 € godišnje vidljiva je prednost kogeneracijskog postrojenja u odnosu na fotonaponske elektrane čija je vrijednost cjenovne uštede gotovo šesterostruko manja. Ugradnjom fotonaponske elektrane se postižu nešto manje financijske uštede 382,99 € godišnje, ali se sa druge strane ne ograničava buduće širenje tvrtke s obzirom na velike površine krovova. Potrebno je napomenuti kako poduzeće bez obzira na zaradu od 48 720,71 € prodaje proizvedenog viška električne energije kogeneracijskog postrojenja ima znatno veću zaradu prodajom peleta. Također, s obzirom na dnevni raspored radnih sati vrhunac proizvodnje električne energije se u svakom dijelu godine poklapa s najvećom potrošnjom poduzeća, a dodatna zarada se u tom slučaju generira kroz prodaju peleta čime se rješava i problem ostataka drvne mase.

7. Literatura

[1] Posavec, S., Zečić, Ž., Beljan, K. i Šimunović, N. (2016). Izračun profitabilnosti i optimizacija kogeneracijskoga postrojenja korištenjem drvne sječke. *Nova mehanizacija šumarstva*, 37 (1), 77-86. Preuzeto s https://hrcak.srce.hr/173815

[2] D. A. Tillman, R. L. Jamison, “Cogeneration with wood fuels: A review,” *Fuel Processing Technology*, vol. 5, no. 3–4, pp. 169–181, Jan. 1982, doi: 10.1016/0378-3820(82)90013-3.

[3] A. Chakraborty, M. Joshi, S. Manjare, and I. A. Karimi, “An industrial perspective of cogeneration – A comprehensive review,” *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 205, p. 109974, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.cep.2024.109974.

[4] D. Lončar, G. Krajačić i V. M., »Podrška developerima - primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvnu biomasu,« u Centar za transfer tehnoligije - CTT, Zagreb, 2009.

[5] A. G. O. Souza, F. de Souza Barbosa, M. S. T. Esperancini, and S. P. S. Guerra, “Economic Feasibility of Electrical Power Cogeneration from Forestry Biomass in an Engineered Wood Panel Industrial Facility,” *Croatian journal of forest engineering*, vol. 42, no. 2, pp. 313–320, Mar. 2021, doi: 10.5552/crojfe.2021.873.

[6] Pelekas, N.; Keskinis, S.; Kosmadakis, I.E.; Elmasides, C. Optimizing Industrial Energy Saving with On-Site Photovoltaics: A Zero Feed-In Case Study in Greece. Solar 2026, 6, 12. https://doi.org/10.3390/solar6020012

[7] L. Polleux, G. Guerassimoff, J.-P. Marmorat, J. Sandoval-Moreno, and T. Schuhler, “An overview of the challenges of solar power integration in isolated industrial mic-rogrids

with reliability constraints," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 155, p. 111955, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111955.

[8] T. A. Nguyen, R. Rigo-Mariani, M. Ortega-Vazquez i D. Kirschen, »Voltage Regulation in Distribution Network Using PV Smart Inverters,« University Of Washington, Department of Electrical Engineering, 2017.

[9] S. Vieira, D. Frey, Y. Besanger, N. Hadjsaid i M. Cordonnier, »Comparative study of voltage regulation in distribution grid based on power electronic devices connected on the LV side of the MV/LV transformer,« HAL, Aalborg, Denmark, 2023.

[10] B. B. Pokhrel, A. Shrestha, S. Phuyal i S. K. Jha, »Voltage Profile Improvement of Distribution System via Integration of Distributed Generation Resources,« Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering, svez. 1, br. 1, pp. 33-41, 2021.

[11] Tečajna lista Hrvatske narodne banke, URL:https://www.hnb.hr/statistika/statisticki-podaci/financijski-sektor/sredisnja-banka-hnb/devizni-tecajevi/tecajna-lista-za-klijente-hnb, pristupljeno 25.6.2026.godine

[12] S. E. Omer, A. Kopljar i A. Hodžić, Biomasa kao gorivo, Bihać: Univerzitet u Bihaću, 2020.

[13] Elektroprivreda HZHB, »Ostale kategorije kupaca,« Elektroprivreda HZ HB, 2024. [Mrežno]. Available: https://ephzhb.ba/kupci/ostali-kupci/, pristupljeno 25.6.2026.godine

[14] Elektroprivreda HZHB, Odluka o utvrđivanju uzvjeta za otkup električne energije od proizvođača električne enerije iz obnovljivih izvora priključenih na distribucijsku mrežu, Odluka-br.-UD-1257_24, Mostar: HB, Elektroprivreda HZ, 2024., dostupno na https://ephzhb.ba/wp-content/uploads/2024/12/Odluka-br.-UD-1257_24.pdf, pristupljeno 25.6.2026.godine

[15] Pavlović R., Tehno ekonomska analiza proizvodnje energije za potrebe drvne industrije, diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2024., Osijek

[16] DIgSILENT, "DIgSILENT PowerFactory 2022," Gomaringen, Germany. [Online]. Available: https://www.digsilent.de/en/

Influence of PV fault ride-through on the stability of bulk power system

N. Mršo[1], P. Marić[2,*], R. Kljajić[2,*], K. Fekete[2]

[1]HEP ODS – Elektroslavonija Osijek, Osijek, Hrvatska
[2]Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, Hrvatska

[*] Corresponding Author. E-mail: predrag.maric@ferit.hr, ruzica.kljajic@ferit.hr

Abstract
The grid code specifies the conditions for connecting power generation systems to national grids. A key requirement of the grid code is the fault ride- through (FRT) capability of generation systems, i.e. the continuation of their operation during and after a fault in the grid, with the aim of improving stability and enabling faster fault recovery. FRT is classified into two categories: low voltage ride- through (LVRT) and high voltage ride- through (HVRT). In this paper, a significant share of PV power plants is integrated into the IEEE 39-bus system model in DIgSILENT PowerFactory software. In the simulation scenarios, PV power plants assume part of the generation previously provided by certain conventional generation units or provide additional generation. Three-phase short circuits are simulated at different locations in the test system model to examine the FRT capability of the PV systems considering inverter limitations. Finally, a sensitivity analysis is performed on the influence of FRT of integrated PV systems on the critical angle, critical fault clearing time, and voltage stability during the fault and after fault clearance.

Keywords: Grid code, FRT, PV integration, critical fault clearing time, voltage stability

1. Introduction

In recent years, the integration of renewable energy sources has increased substantially due to the scarcity of fossil fuels such as coal, natural gas and oil [1]. Renewable energy sources (RES), such as solar, wind, and geothermal energy, play a significant role in electricity production [2]. These sources represent limitless energy sources with competitive costs, making them a superior alternative compared to fossil fuels [3].
Photovoltaic (PV) power plants play a leading role due to their accessibility, zero-emission energy, and substantial return on investment [2]. In 2008. the installed capacity of PV plants was 15 GW, while by 2018 it had increased to 505 GW [2]. It is expected that PV plants will account for 45% of total energy production from RES [1].

However, integration of PV plants has drawbacks such as weather variability, location limitations, and low inherent inertia [3]. It causes concerns including maintenance and system stability due to the variability of their nature [1].

Small PV systems are connected to the grid by DC/DC converters and voltage-source converters [4]. PV plants are mostly connected to the medium- and high-voltage grids, which can cause challenges, so power system operators (PSOs) introduced grid codes [4,5].

Grid codes are developed to restrict the stationary and dynamic behavior of PV plants [6]. They are essential for stability and reliability protection in the grid [7]. Every country defines its own grid codes to satisfy technical criteria [8], which are adapted to their grid conditions [7]. By establishing the grid codes, PSOs can coordinate PV plants' functioning efficiently among other energy sources [7]. This results in a balanced and stable energy supply [7].

According to the European Commission Regulation (EU) 2016/631 [9], the parameter ranges for FRT capabilities are defined. Usually, the fault clearing time in Europe is approximately 150 ms; therefore, this regulation sets the upper limit at 250 ms to allow flexibility.

One of the main requirements is the ability to maintain the voltage during the fault, which is called fault ride-through (FRT) [5].

FRT represents the system behavior during and after grid faults [5]. Based on the European Commission Regulation (EU) 2016/631 [9] (Article 2), FRT is defined as the capability of electrical devices to remain connected to the grid and operate during voltage sags for a specific period of time. FRT is separated into two categories: low-voltage ride-through (LVRT) and high-voltage ride-through (HVRT) [5]. LVRT refers to voltage sag, while HVRT refers to voltage swells [5]. FRT capability is represented by two types of diagrams: a voltage-time or frequency-time curve [8].

LVRT represents the ability of a PV system to remain connected to the grid during faults for a specific period of time. Faults can be caused by short circuits, lightning strikes, connecting huge loads [5]. To ensure the PV system remains connected to the grid during the fault, it is necessary to solve key issues. Due to overcurrent on the AC side of the inverter and overvoltage on the DC side, an imbalance of energy flow between the PV side and the grid occurs. Reactive current is essential for overcoming faults and voltage recovery; therefore, injecting reactive current into the grid is necessary. Some countries such as Spain, China, and Japan allow voltage variations up to 20%, whereas Australia, Italy, and South Africa require the PV plant to stay connected even if the voltage drops to zero.

On the contrary, HVRT symbolizes the capability of a PV system to remain connected to the grid during voltage swells [5]. HVRT capability contributes to conservation of overall stability in the grid and allows avoiding critical situations [5]. Most of the grid codes do not establish rules for HVRT capability despite its rarity [8]. Some countries such as Spain and Australia allow swells up to 130%, while the USA and Germany can withstand 120% [8].

After the fault clearing time, the PV plant is required to reconnect to the grid within a short period [11]. Table 1 shows a summary of the comparison of HVRT and LVRT criteria:

Table 1. Comparison of HVRT and LVRT [5,6,10]

HVRT	LVRT
Voltage swells	Voltage sags
Does not have to be defined	Strictly defined
Rare	Usual
Caused by grid overvoltage disturbances and poor voltage regulation	Caused by short circuits, lightning strikes, and connecting huge loads
Local problem, does not affect stability	Critical for stability

In [12], a new strategy for FRT including the power tracking trajectory is suggested. An alternative environment of a PV system is simulated, while the grid voltage is reduced to different values. System operation is simulated by using the LVRT strategy of changing the power tracking trajectory. Results show the efficacy of the proposed theory in given conditions; LVRT is accomplished successfully. Besides ensuring secure and reliable operation, it enhances the economy of PV plants.

The main contribution of [13] is a suggested neural network-based framework. Simulations are performed on a PV microgrid with FRT capability using a DC chopper circuit. Integration of the neural network model led to significant improvements in the PV system. The neural network model shows a capability to reduce the voltage disturbances. That is key to providing reliable and effective operation of the PV system. Assessment of this system was based on cutting-edge technologies, which shows the importance of an innovative approach.

Different FRT strategies and voltage support strategies were observed in [14]. According to [14], the main aim for PV systems is to remain connected to the grid. However, FRT implementation poses some challenges. FRT in PV systems brings a bright perspective. To achieve a sustainable and strong energy environment, the growth and implementation of LVRT and HVRT strategies are essential.

In [15], the LVRT abilities of PV systems are explored. The main emphasis is on comparative analysis of two types of inverters: grid-following (GFL) and grid-forming (GFM), which are under current restrictions. The authors developed a comprehensive model of a grid-connected PV system, and FRT simulations are demonstrated. The results show that when it comes to stability maintenance, GFL inverters reach better results compared to GFM. This is very important for improving LVRT strategy in PV systems.

Fault classifications in a PV system connected to the grid with emphasis on wavelet transformation and neural network methods are explored in [16]. Simulations were carried out in MATLAB on a 2 kW PV system. Results show that the suggested technique presents a better option compared to other techniques because of fault classification efficiency and time of detection. The precision of this technique reached 98.3%, with a lower time of detection compared to other mentioned techniques.

2. Model description

To evaluate the impact of photovoltaic fault ride-through capabilities on the transient and voltage stability of bulk power systems, a comprehensive dynamic simulation framework was established. The simulations in this paper were performed on the IEEE 39-bus test system implemented in the DIgSILENT PowerFactory software as described in [17]. IEEE 39-bus test system is composed of 39 buses, 12 transformers, 10 generation units, 19 loads, and 34 transmission lines. The majority of transmission grid lines operate at the 345 kV voltage level. All ten synchronous generators are equipped with governors and automatic voltage regulators to ensure primary frequency regulation and realistic voltage control [17]. Active power dispatch and voltage setpoint of synchronous generators are presented in table 2.

Table 2. Active power and voltage setpoint of synchronous generators

Generator	Active Power [MW]	Voltage [p.u].
G 01	1000	1,03
G 02	0	0,982
G 03	650	0,9831
G 04	632	0,9972
G 05	254	1,0123
G 06	650	1,0493
G 07	560	1,0635
G 08	250	1,0278
G 09	830	1,0265
G 10	250	1,0475

The 19 loads distributed across the grid have voltage dependency.
Integration of PV power plant is realized using *DIgSILENT Template "WECC Large-scale PV Plant 110MVA 60Hz"* model, with voltage protection, frequency protection and rate-of-change-of-frequency (ROCOF) protection included. A grid-following control strategy with active power dispatch of 100 MW, (cosφ=1) has been chosen for all operational states used in the paper.

3. Study case

The influence of FRT on critical fault clearing time and angle has been evaluated on part of the bulk power IEEE 39-bus test system. A large-scale PV plant has been integrated at Bus 16, which is close to generators G04, G05, G06 and G07. The short-circuit simulation has been performed on the midpoint of Line 16–19, which connects Bus 16 and Bus 19, as shown in Fig. 1.

The critical fault clearing time has been determined with respect to generator G04 since, compared with G05, G06 and G07, its rotor angle (relative to the reference machine angle) is the first to reach the maximum angle according to the equal-area criterion (blue curve in Fig. 2).

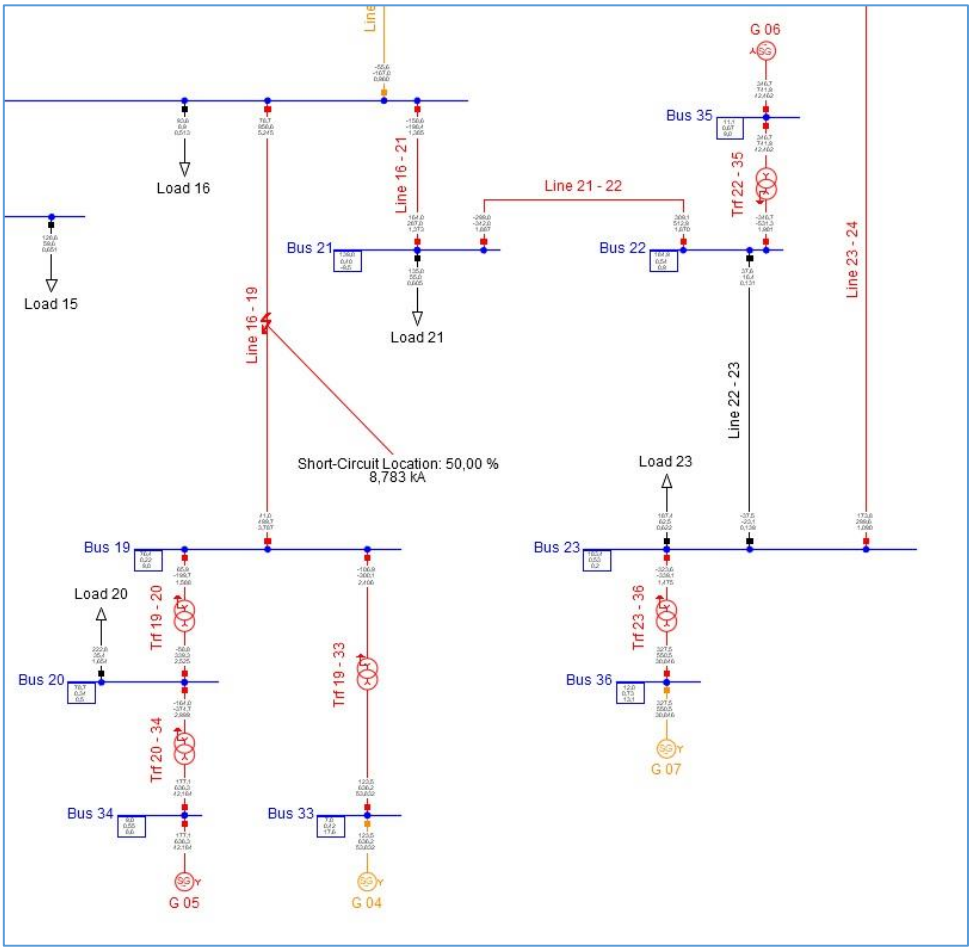


Figure 1. Fault location

The short circuit is initiated at time t = 0,1 s and cleared at time t = 0,284 s, within a simulation span with a total duration of 3 s, revealing a critical fault clearing time of **184 ms.**

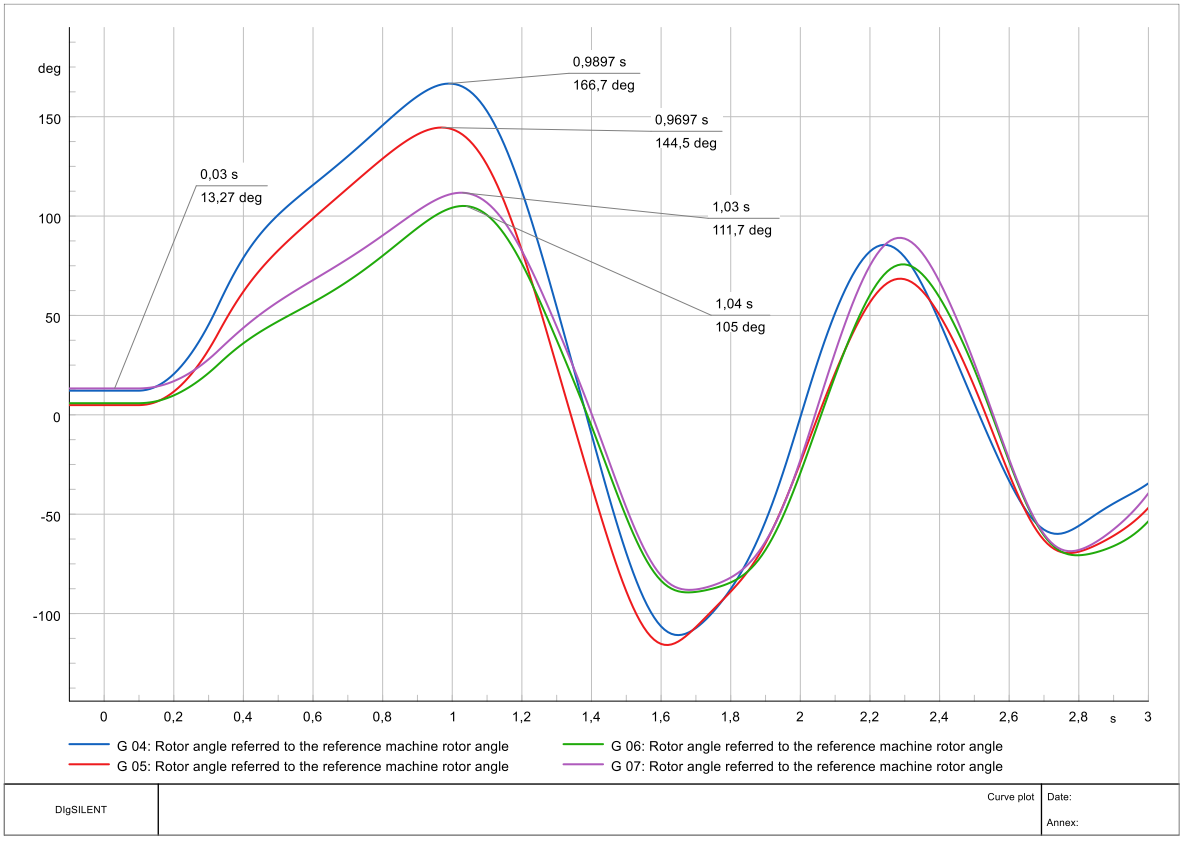


Figure 2. Rotor angles of generators G04, G05, G06 and G07 during the simulation span of the short-circuit on Line 16-19.

The same simulation with the same fault-clearing time of 184 ms was performed after the integration of a large-scale PV power plant on Bus 16 (Fig.3).

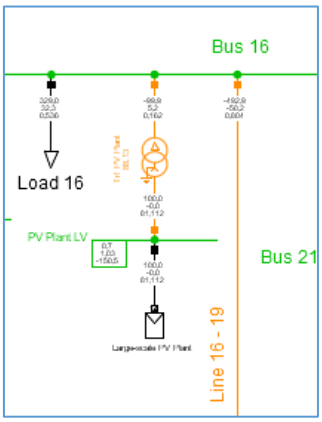


Figure 3. Integration of large-scale PV power plant on Bus 16.

Integration of large-scale PV power plant negatively influenced transient stability of observed four generators, since with the same fault-clearing time, generators G04 and G05 reached stability margins and have been tripped- Fig.4.

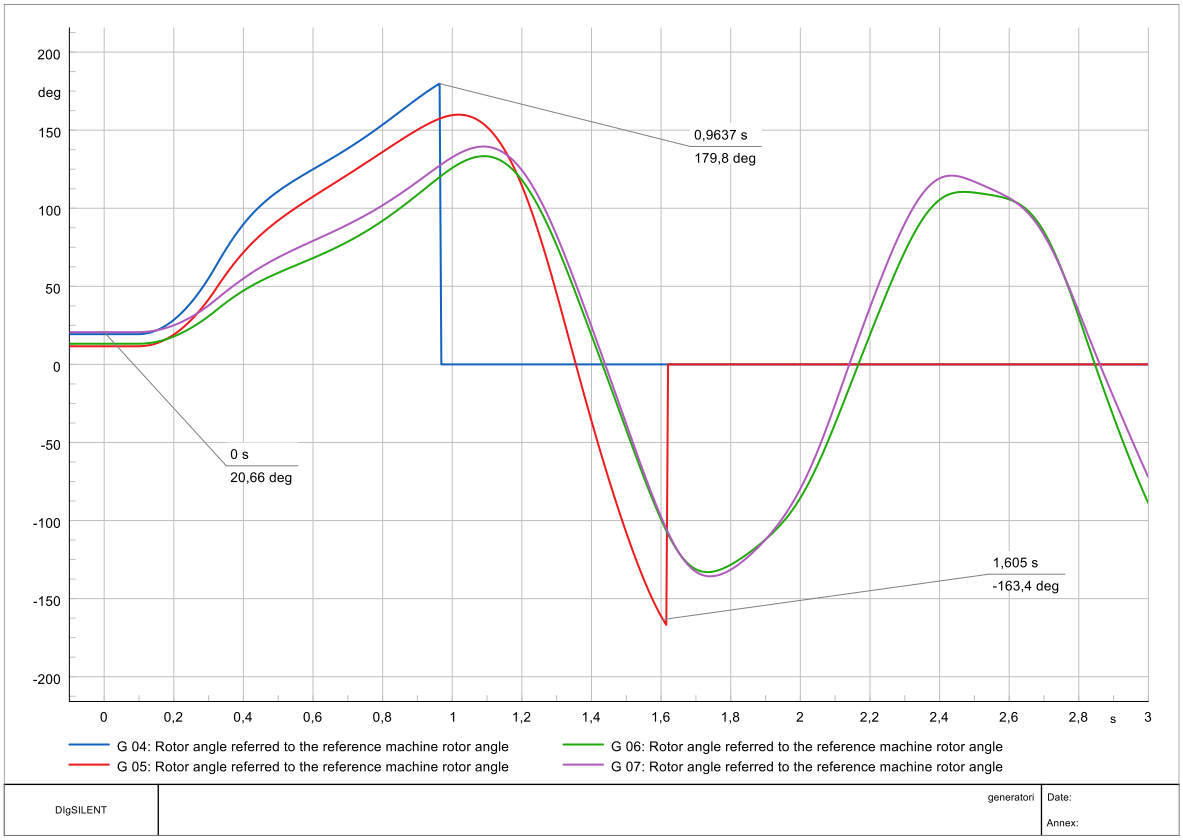


Figure 4. Rotor angles of generators G04, G05, G06, and G07 during the simulation span of the short circuit on Line 16–19, with a fault-clearing time of 184 ms and integration of the large-scale PV power plant at Bus 16.

During the short-circuit, the voltage on the large-scale PV power plant busbar dropped to 0.38 p.u., which, within the fast undervoltage tripping time delay, led to the large-scale PV power plant tripping- Fig.5.

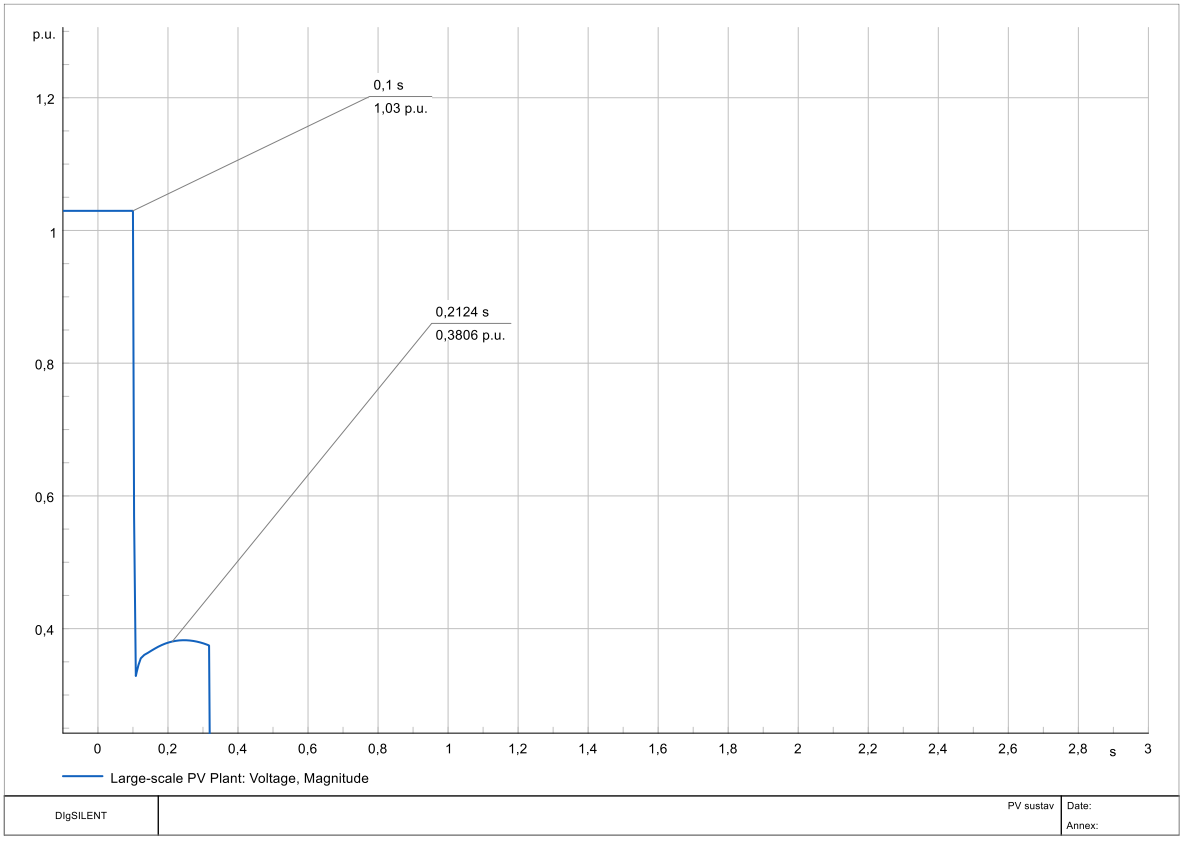


Figure 5. Voltage at large-scale power plant during short-circuit simulation span (undervoltage tripping).

To achieve long- term stable operation of the four observed generators after short-circuit clearance (rotor angle increase after 2 s from the start of the simulation- Fig.6), the fault-clearing time should be 177 ms.

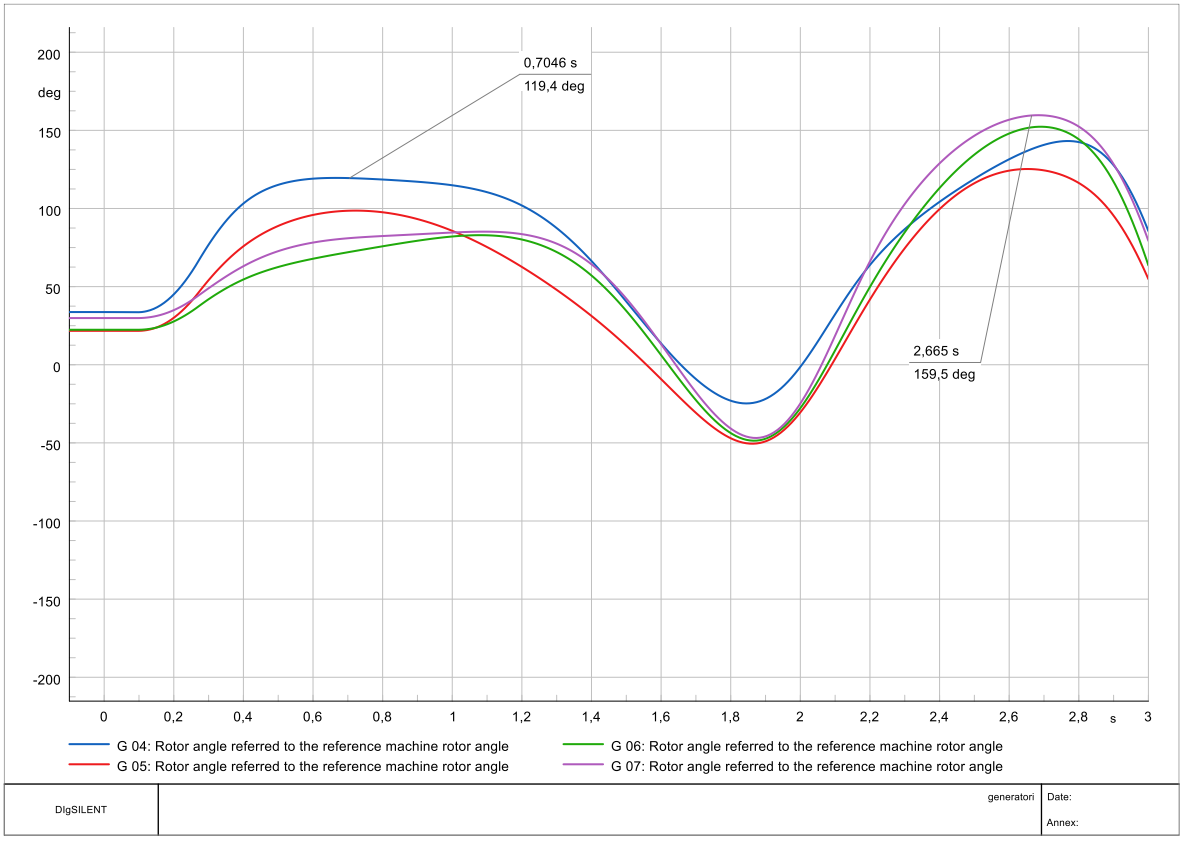


Figure 6. Rotor angles of generators G04, G05, G06, and G07 during the simulation span of the short circuit on Line 16–19, with a fault-clearing time of 177 ms and integration of the large-scale PV power plant at Bus 16.

Enabling FRT for the large-scale PV power plant slightly increases the critical fault-clearing time to 188 ms, as shown in Fig. 7. During and immediately after the fault, the voltage on the large-scale power plant busbar is below operational limits, which is enabled by LVRT (undervoltage protection trip blockage), while during the rest of simulation span, the voltage rises above the operational limits, enabled by HVRT (overvoltage protection trip blockage), and then drops below operational limits again.

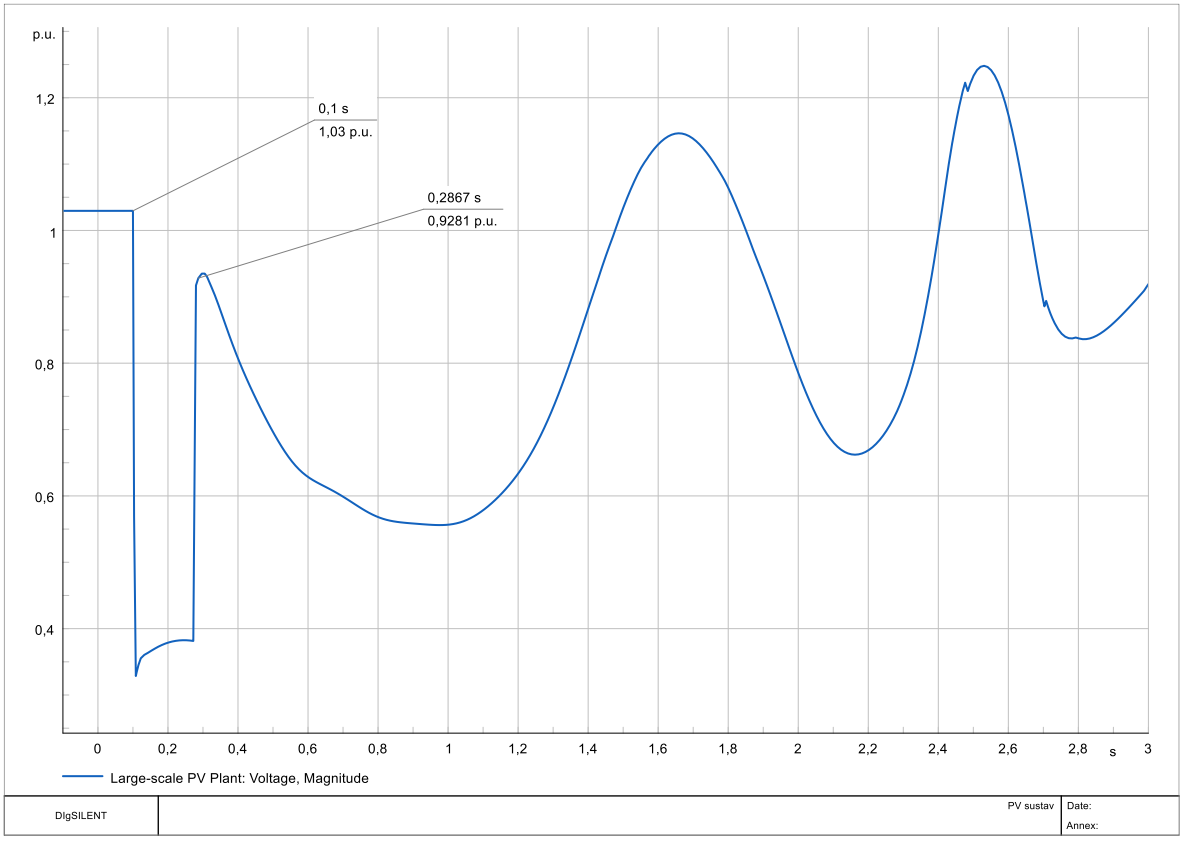


Figure 7. Voltage at a large-scale power plant during short-circuit simulation span- FRT enabled.

Long-term stable operation is also evident in the rotor angles, as there is no overshoot after 2 seconds from the start of the simulation-Fig. 8)

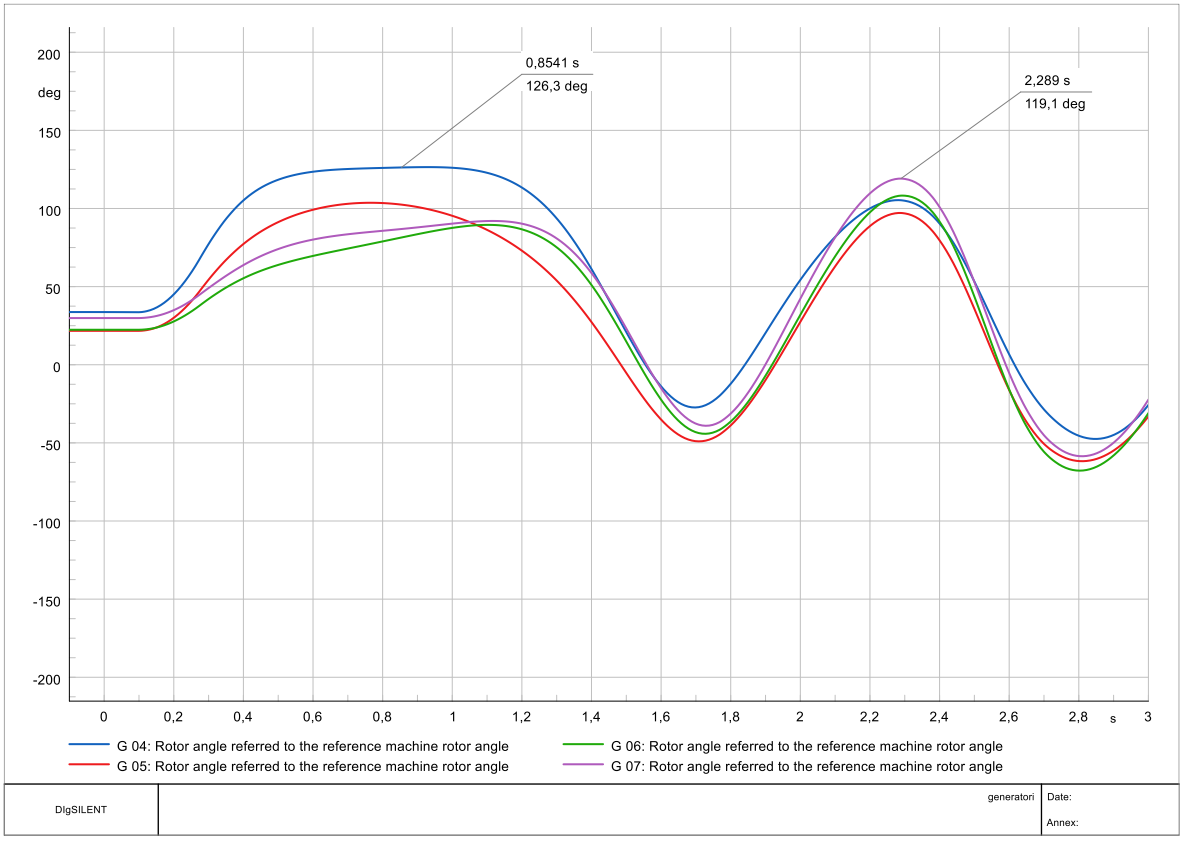


Figure 8. Rotor angles of generators G04, G05, G06, and G07 during the simulation span of the short circuit on Line 16–19, with a fault-clearing time of 186 ms and integration of the large-scale PV power plant at Bus 16 with FRT enabled

Integration of renewable energy sources can replace part of the conventional generation. Since an additional 100 MW of active power has been integrated into the system through the large-scale PV power plant, a reduction of 50 MW in active power generation will be applied to each of generators G04 and G05.

Critical fault-clearing time for the same simulation of the short-circuit has been increased to 233 ms (t=0,333 s - 0,1 s=0,233 s)- Fig.9.

Rotor angles of the observed generators with reduction of 50 MW active power for G04 and G05 and enabled FRT for the large-scale power plant are presented on Fig. 10.

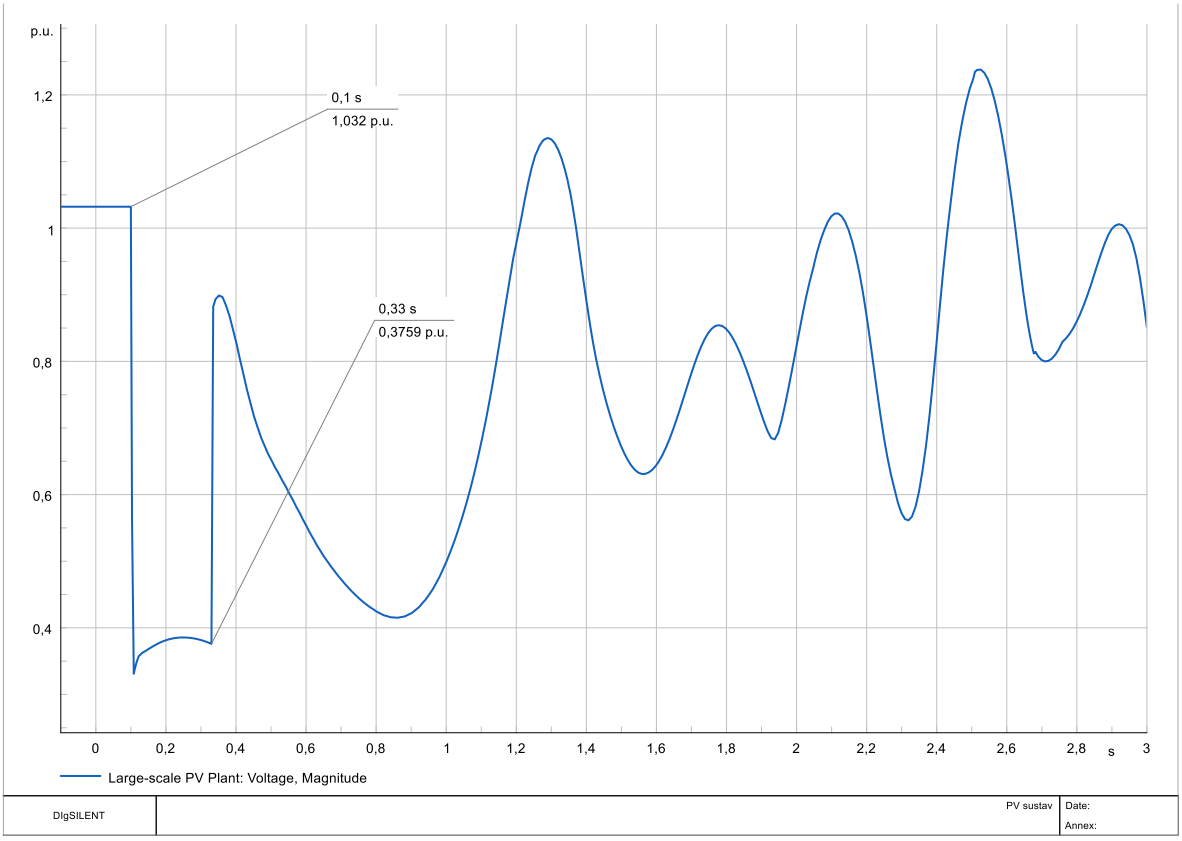


Figure 9. Voltage at a large-scale power plant during short-circuit simulation span- FRT enabled

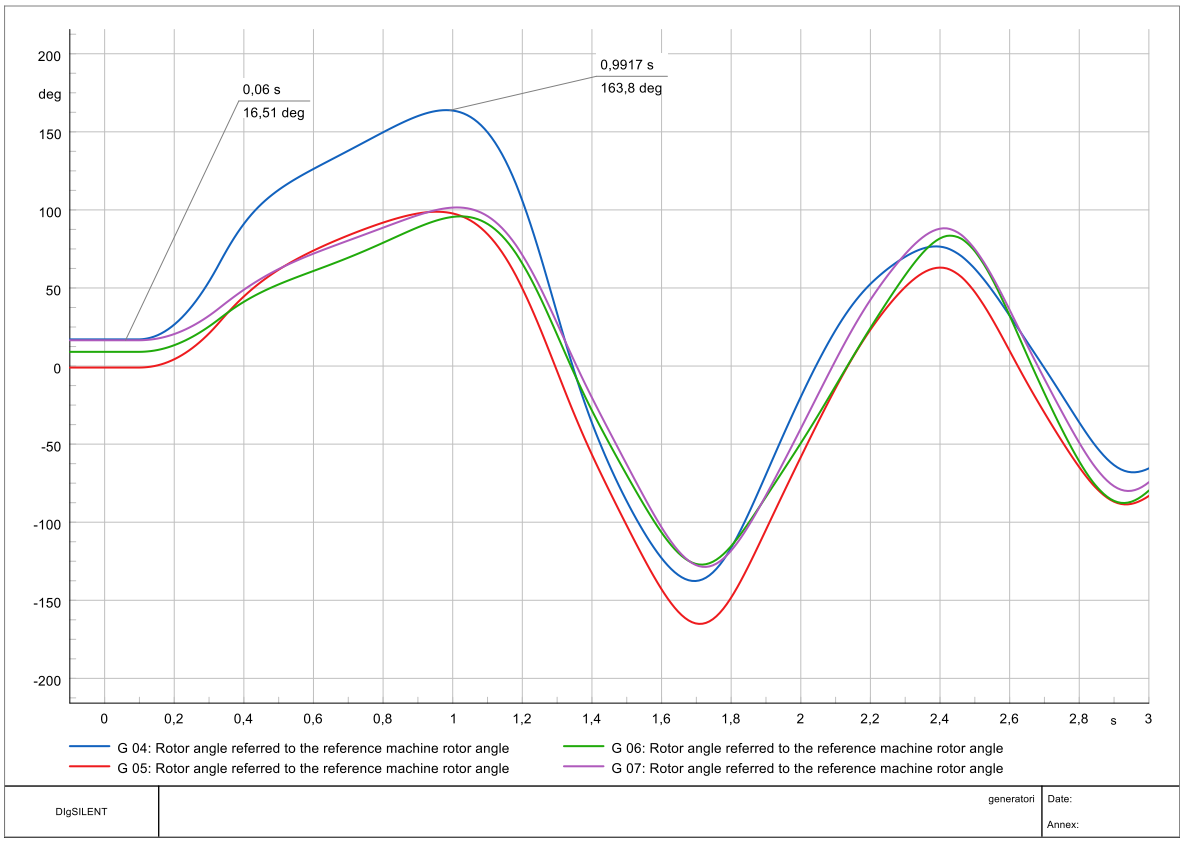


Figure 10. Rotor angles of generators G04, G05, G06, and G07 during the simulation span of the short circuit on Line 16–19, with a fault-clearing time of 233 ms and integration of the large-scale PV power plant at Bus 16 with FRT enabled, and reduction of 50 MW each for G04 and G05

4. Conclusions

This paper investigated the impact of PV power plant FRT capabilities on the transient stability and voltage values of a section of the bulk power IEEE 39-bus system test model. The conducted simulations showed that the integration of large-scale PV plants without appropriate FRT settings can adversely affect system stability, as rapid undervoltage protection activation caused PV power plant trip during the fault and intensified post-fault power imbalance.

Without PV power plant FRT capability, the critical fault clearing time of 184 ms led to loss of synchronism of generators G04 and G05. To obtain stable long-term operation, the critical fault clearing time was slightly reduced to 177 ms. On the other hand, enabling FRT capability allows the PV power plant to remain connected during post-fault voltage dips and rises, and has insignificantly increased the critical fault clearing time from 184 ms to 188 ms. The best results were obtained by combining PV power plant generation with reduced conventional generation active power dispatch, based on the value of PV power plant active power dispatch. The critical fault clearing time obtained in this way is 223 ms, which can be

considered as an improvement and indicates that only the integration strategy in which the PV power plant operates with FRT enabled, combined with a reduction in conventional generation active power dispatch equal to the value of PV power plant dispatch can be considered beneficial for transient stability. Also, with FRT enabled, the voltage at the PV power plant busbar during and after the simulated short-circuit remains within the LVRT and HVRT ranges valid for most countries.

To enable more detail conclusions about the influence of PV power plants' FRT capability on transient and voltage stability of a bulk power system, additional research on different PV power plant sizes and integration locations should be carried out, which will be the authors' future work.

5. References

[1] J. S. Ali, Y. Qiblawey, A. Alassi, A. M. Massoud, S. M. Muyeen and H. Abu-Rub, "Power System Stability With High Penetration of Renewable Energy Sources: Challenges, Assessment, and Mitigation Strategies," in IEEE Access, vol. 13, pp. 39912-39934, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3546491

[2] Ali Khan, M..; Liu, H.; Yang, Z.; Yuan, X. A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters, Their Modulation Techniques, and Control Strategies. Energies 2020, 13, 4185. https://doi.org/10.3390/en13164185

[3] T. E. K. Zidane et al., "Grid-Connected Solar PV Power Plants Optimization: A Review," in IEEE Access, vol. 11, pp. 79588-79608, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3299815.

[4] H. Dehghani Tafti, A. I. Maswood, Z. Lim, G. H. P. Ooi and P. H. Raj, "NPC photovoltaic grid-connected inverter with ride-through capability under grid faults," 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Sydney, NSW, Australia, 2015, pp. 518-523, doi: 10.1109/PEDS.2015.7203401.

[5] Kamran Zeb, Saif Ul Islam, Imran Khan, Waqar Uddin, M. Ishfaq, Tiago Davi Curi Busarello, S.M. Muyeen, Iftikhar Ahmad, H.J. Kim, Faults and Fault Ride Through strategies for grid-connected photovoltaic system: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 158, 2022, 112125, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112125.

[6] Q. Zheng, J. Li, X. Ai, J. Wen and J. Fang, "Overivew of grid codes for photovoltaic integration," 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2017.8245501

[7] Rajendran, G.; Raute, R.; Caruana, C. A Comprehensive Review of Solar PV Integration with Smart-Grids: Challenges, Standards, and Grid Codes. Energies 2025, 18, 2221. https://doi.org/10.3390/en18092221

[8] M.T. Hagh, T. Khalili, A review of fault ride through of PV and wind renewable energies in grid codes, International Journal of Energy Research, Volume 43, Issue 4, pp. 1342-1356, October 2018, DOI:10.1002/er.4247

[9] UREDBA KOMISIJE (EU) 2016/631 od 14. travnja 2016. o uspostavljanju mrežnih pravila za zahtjeve za priključivanje proizvođača električne energije na mrežu, Document 32016R0631, ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2016/631/oj, dostupno na: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/ALL/?uri=CELEX:32016R0631

[10] G. Landera, Y.; C. Zevallos, O.; Neto, R.C.; Castro, J.F.d.C.; Neves, F.A.S. A Review of Grid Connection Requirements for Photovoltaic Power Plants. Energies 2023, 16, 2093. https://doi.org/10.3390/en16052093
[11] Fei Li, Mengtao Liu, Yingfeng Wang, Xing Zhang, Research on HIL-based HVRT and LVRT automated test system for photovoltaic inverters, Energy Reports, Volume 7, Supplement 6, 2021, Pages 405-412, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.026
[12] Tiecheng Li, Hui Fan, Siming Zeng, Xuekai Hu, Zhengji Meng, Yuhao Zhao, A low voltage ride-through strategy for grid-connected PV converters based on variable power point tracking method, Energy Reports, Volume 8, Supplement 13, 2022, Pages 398-404, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.167
[13] Khan, M.A.; Kim, J. Smart Sag Detection and Reactive Current Injection Control for a PV Microgrid under Voltage Faults. Energies 2023, 16, 6776. https://doi.org/10.3390/en16196776
[14] S.S. Sahoo, A. Beheramali, A Review of Fault Ride through Approach in Solar Photo Voltaic System, October 2023, Advances in Applied Science Research 14(5):8, DOI: 10.36648/0976-8610.14.4.121
[15] Z.M. Almesri,H.A. Hussain;R.M. Kamel, Low Voltage Ride-Through Capability of Grid-Connected PV Systems: A Comparative Study of Grid-Following and Grid-Forming Converters Under Current Limits, IEEE Access, Volume 13, 2025, Pages: 105590 – 105607, DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3580643
[16] Komal Bai, Vikas Sindhu, Ahteshamul Haque, Fault Ride Through approach for Grid-Connected Photovoltaic System, e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy,Volume 5, 2023, 100232, ISSN 2772-6711, https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100232
[17] DIgSILENT PowerFactory, 39 Bus New England System, DIgSILENT GmbH, Heinrich-Hertz-Str. 9, 72810 Gomaringen, Germany, www.digsilent.de

Utjecaj lokacije obnovljivih izvora energije na ekonomsku isplativost
Impact of renewable energy source location on economic feasibility

D. Katarina[1,*], S. Kaluđer[1], K. Fekete[2], R. Kljajić[2]

[1]HEP ODS, Elektroslavonija Osijek, Hrvatska
[2]Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: denis.katarina@hep.hr

Sažetak
U radu je provedena tehno-ekonomska analiza fotonaponskih elektrana instalirane snage 1 MW i 2 MW na području općine Darda. Analiza obuhvaća odabir optimalne lokacije, procjenu utjecaja priključenja na 10 kV distribucijsku mrežu te ekonomsku usporedbu različitih scenarija koji uključuju godišnje troškove održavanja, degradaciju proizvodnje fotonaponskih modula i financiranje investicije kreditom. Ekonomska isplativost procijenjena je primjenom pokazatelja ukupnog troška životnog vijeka (eng. *Life Cycle Cost* - LCC), neto sadašnje vrijednosti (NPV) i niveliranog troška proizvedene električne energije (eng. Levelized Cost of Electricity LCOE). Rezultati pokazuju da su obje elektrane ekonomski opravdane, pri čemu elektrana snage 1 MW ostvaruje veću otpornost na promjene ulaznih parametara zbog više otkupne cijene električne energije, dok elektrana snage 2 MW postiže niži LCOE. Također je utvrđeno da financiranje dijela investicije kreditom povećava neto sadašnju vrijednost projekta u odnosu na financiranje vlastitim sredstvima. Dobiveni rezultati potvrđuju da isplativost fotonaponskih elektrana ovisi o odabranoj lokaciji, modelu financiranja, otkupnoj cijeni električne energije i dugoročnim uvjetima eksploatacije.

Ključne riječi: fotonaponska elektrana; tehno-ekonomska analiza; neto sadašnja vrijednost (NPV); ukupni trošak životnog vijeka (LCC); nivelirani trošak električne energije (LCOE).

Abstract
This paper presents a techno-economic analysis of 1 MW and 2 MW photovoltaic power plants planned for the Municipality of Darda. The analysis includes the selection of the optimal location, assessment of the impact of grid integration into the 10 kV distribution network, and an economic comparison of different scenarios considering annual operation and maintenance costs, photovoltaic module degradation, and project financing through a bank loan. The economic feasibility was evaluated using the Life Cycle Cost (LCC), Net Present Value (NPV), and Levelized Cost of Electricity (LCOE) indicators. The results show that both projects are economically viable. The 1 MW photovoltaic power plant is more

resilient to changes in input parameters due to the higher electricity purchase price, while the 2 MW power plant achieves a lower LCOE. Furthermore, financing part of the investment through a bank loan increases the project's net present value compared with financing solely through equity. The obtained results confirm that the economic viability of photovoltaic power plants depends on the selected location, financing model, electricity purchase price, and long-term operating conditions.

Key words: photovoltaic power plant; techno-economic analysis; Net Present Value (NPV); Life Cycle Cost (LCC); Levelized Cost of Electricity (LCOE).

1. Uvod

Posljednjih desetljeća fotonaponske elektrane postale su jedan od najznačajnijih obnovljivih izvora energije zahvaljujući smanjenju cijene opreme, povećanju učinkovitosti fotonaponskih modula te razvoju modela poticanja proizvodnje električne energije. Unatoč tehnološkom napretku, ekonomska opravdanost izgradnje fotonaponske elektrane i dalje ovisi o brojnim čimbenicima, među kojima se izdvajaju lokacija elektrane, investicijski troškovi, tržišna cijena električne energije te odabrani model financiranja [1], [2]. Procjena isplativosti fotonaponskih elektrana temelji se na primjeni različitih pokazatelja tehno-ekonomske analize. U literaturi se najčešće koriste ukupni trošak životnog vijeka (LCC), nivelirani trošak proizvedene električne energije (LCOE), neto sadašnja vrijednost (NPV), vrijeme povrata investicije. Pouzdanost navedenih pokazatelja uvelike ovisi o odabranim ulaznim parametrima, kao što su diskontna stopa, inflacija, troškovi održavanja i godišnja degradacija fotonaponskih modula te financiranje investicije [2], [3], [4], [5], [6]. Osim ekonomskih pokazatelja, važan utjecaj na isplativost ulaganja ima i odabir lokacije. Udaljenost od distribucijske mreže, troškovi priključenja te tehnička ograničenja elektroenergetskog sustava mogu značajno utjecati na ukupnu vrijednost investicije. Istodobno, uvjeti priključenja propisani mrežnim pravilima određuju najveću dopuštenu priključnu snagu i predstavljaju jedan od ključnih čimbenika pri planiranju fotonaponskih elektrana [7], [5], [8].

U radu je provedena tehno-ekonomska analiza fotonaponskih elektrana instalirane snage 1 MW i 2 MW na odabranoj lokaciji u općini Darda. Analiza obuhvaća procjenu ekonomskih pokazatelja za različite scenarije rada, uključujući utjecaj troškova održavanja, degradacije fotonaponskih modula i financiranja investicije kreditom, s ciljem usporedbe ekonomske isplativosti promatranih sustava.

2. Metodologija

Ekonomska procjena investicije u fotonaponsku elektranu ne može se temeljiti na jednom pokazatelju, već zahtijeva primjenu više ekonomskih pokazatelja koji zajedno omogućuju procjenu isplativosti projekta [2]. U provedenoj analizi u obzir je uzeta vremenska vrijednost novca, pri čemu su svi novčani tokovi izraženi u realnim vrijednostima primjenom realne diskontne stope. Na taj je način utjecaj inflacije uključen u postupak proračuna te se u daljnjim matematičkim izrazima ne prikazuje zasebno [2], [9]. Metodologija rada temelji se na izračunu ukupnog troška životnog vijeka (engl. *Life Cycle Cost* – LCC), niveliranog troška

proizvedene električne energije (engl. *Levelized Cost of Electricity* – LCOE) i neto sadašnje vrijednosti (engl. *Net Present Value* – NPV).
Na ekonomsku isplativost analiziranih fotonaponskih elektrana utječu sljedeći parametri [1], [2]:

- Početna investicija (engl. Initial investment) – obuhvaća troškove nabave opreme, izgradnje elektrane, priključenja na elektroenergetsku mrežu te ostale početne troškove projekta.
- Troškovi rada i održavanja (engl. Operation and maintenance costs) – uključuju redovito održavanje elektrane i ostale operativne troškove tijekom njezina životnog vijeka.
- Troškovi financiranja (engl. Financing costs) – odnose se na troškove otplate kredita i kamata u scenarijima u kojima se investicija financira kreditnim sredstvima.
- Degradacija fotonaponskih modula (engl. Module degradation) – predstavlja postupno smanjenje proizvodnje električne energije tijekom eksploatacijskog vijeka modula.
- Proizvodnja električne energije (engl. Electricity production) – ovisi o instaliranoj snazi elektrane, karakteristikama lokacije i raspoloživom Sunčevom zračenju te predstavlja osnovu za izračun ekonomskih pokazatelja.
- Diskontna stopa (engl. Discount rate) – koristi se za preračun budućih novčanih tokova na njihovu sadašnju vrijednost.

Za procjenu ukupnih troškova tijekom životnog vijeka fotonaponske elektrane korišten je pokazatelj ukupnog troška životnog vijeka (LCC), koji se računa prema izrazu (2-1) [2]:

$$LCC = C_{cap}(1-f_l) + C_{cap} f_l \left(\frac{\left(\frac{A}{P}(r_l, N_l)\right)}{\left(\frac{A}{P}(r_{d0}, N_l)\right)} \right) + \frac{A_M}{\left(\frac{A}{P}(r_{d0}, N)\right)} + \frac{C_n}{(1+r_{d0})^n} - \frac{C_{salv}}{(1+r_{d0})^N} \qquad (2\text{-}1)$$

gdje su: C_{cap} – ukupno kapitalno ulaganje, f_l – udio financiranja putem kredita, r_l – kamata na kredit, N_l – broj godina otplate kredita, r_{d0} – realna diskontna stopa, A_M – godišnji trošak održavanja, C_n – jednokratni trošak zamjene (npr. izmijenjivača), *n* – godina u kojoj se zamjena događa, C_{salv} – rezidualna vrijednost sustava pri dekomisiji, *N* – životni vijek sustava u godinama, $\frac{A}{P}(r, N)$ – faktor kapitalnog oporavka za kamatnu odnosno diskontnu stopu ri broj godina N. Izraz se sastoji od pet članova koji redom predstavljaju ukupni vlastiti udio kapitalnog ulaganja, ukupni trošak otplate kredita, ukupne troškove održavanja, ukupne troškove zamjene opreme te ostatnu vrijednost sustava na kraju životnog vijeka.
Prosječni trošak proizvodnje električne energije tijekom životnog vijeka fotonaponske elektrane procijenjen je primjenom pokazatelja niveliranog troška proizvedene električne energije (LCOE). Najprije je prema izrazu (2-2) određena ukupna diskontirana proizvodnja električne energije tijekom životnog vijeka elektrane [2]:

$$E_{PV} = \sum_{n=1}^{25} \frac{E_1(1-d)^{n-1}}{(1+r_{d0})^n} \qquad (2\text{-}2)$$

gdje su: E_{PV} – ukupna diskontirana proizvodnja električne energije tijekom životnog vijeka elektrane, E_1– proizvodnja električne energije u prvoj godini rada, *d* – godišnje umanjenje proizvodnje od 1% (*d*=0.01), r_{d0}– realna diskontna stopa, *n*– godina promatranja.

Nakon određivanja ukupne diskontirane proizvodnje električne energije, LCOE je izračunat prema izrazu (2-3) [2]:

$$LCOE = \frac{LCC}{E_{PV}} \tag{2-3}$$

LCOE predstavlja prosječni trošak proizvodnje 1 MWh električne energije tijekom životnog vijeka elektrane. Ekonomska isplativost projekta procijenjena je primjenom neto sadašnje vrijednosti (NPV), koja se računa prema izrazu (2-4) [3]:

$$NPV = -\mathrm{LCC} + \sum_{n=1}^{N} \frac{B_n}{(1+r_{d0})^n} \tag{2-4}$$

gdje je: B_n – prihodi u godini n. Izraz predstavlja razliku između diskontiranih novčanih primitaka i izdataka tijekom životnog vijeka projekta. Pozitivna vrijednost NPV-a (NPV > 0) označava financijski isplativu investiciju, vrijednost jednaka nuli (NPV = 0) predstavlja graničnu isplativost, dok negativna vrijednost (NPV < 0) upućuje na ekonomsku neisplativost projekta. Vrijeme povrata investicije određeno je na temelju godišnjih vrijednosti NPV-a, pri čemu se godinom povrata smatra prva godina u kojoj kumulativna neto sadašnja vrijednost postane pozitivna.

Za provedbu ekonomske analize potrebno je prethodno odrediti godišnju proizvodnju električne energije, godišnje prihode od prodaje proizvedene energije te godišnje troškove rada i održavanja. Navedene veličine određene su prema izrazima (2-5) i (2-6):

$$E_t = P_{inst} \cdot E_{godišnje} \tag{2-5}$$

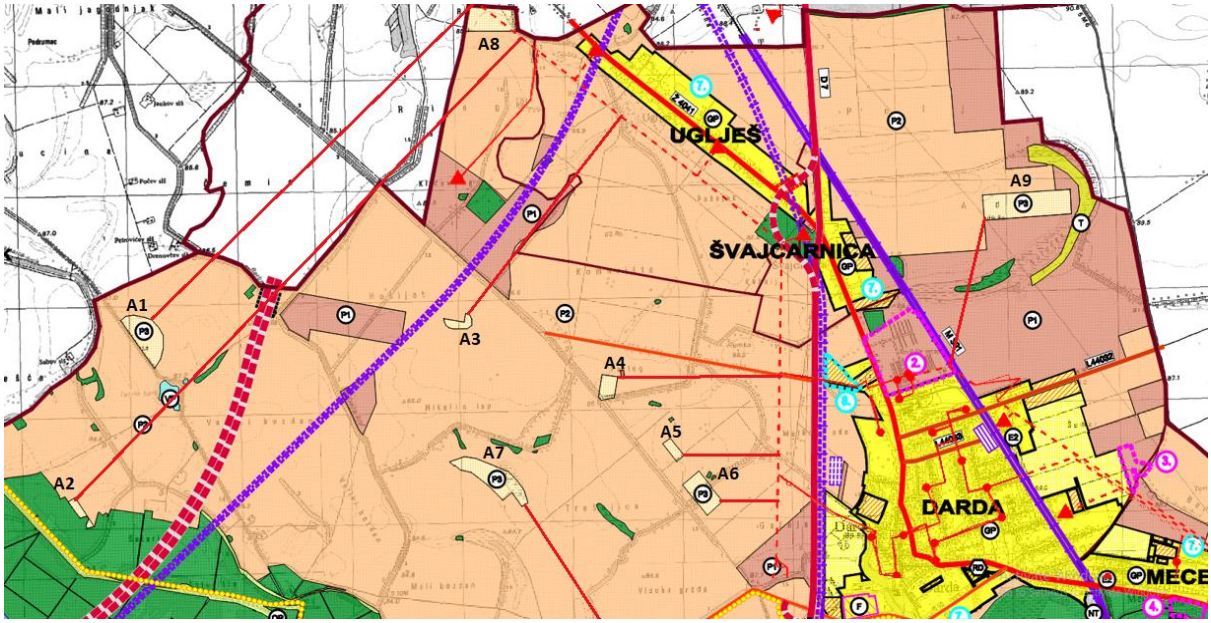
gdje su: E_t – prosječna godišnja proizvedena električna energija, P_{inst} – instalirana snaga fotonaponske elektrane, $E_{godišnje}$ – prosječna proizvedena električna energija po 1kW fotonaponskih panela. Godišnji prihod od prodane električne energije B_n se računa kao:

$$B_n = E_t \cdot Z_{1-2MW} \tag{2-6}$$

gdje je $Z_{1\text{-}2MW}$ – jedinična prodajna cijena električne energije (€/MWh), ovisno o instaliranoj snazi elektrane.

3. Analiza lokacije i odabir najpovoljnije lokacije

Analiza je provedena na području općine Darda, gdje je Prostornim planom uređenja definirano 12 površina namjene P3 predviđenih za izgradnju fotonaponskih elektrana [7]. Položaj svih lokacija i postojeće 10 kV distribucijske mreže prikazan je na Slici 1. Napajanje promatranog područja ostvaruje se preko tri 10 kV izvoda koji polaze iz trafostanice Bilje 35/10 kV, pri čemu je priključenje fotonaponske elektrane moguće na bilo koji od njih. Budući da troškovi priključenja ovise o duljini priključnog voda, odabir lokacije predstavlja jedan od ključnih koraka u tehno-ekonomskoj analizi. Cjelokupna analiza prikazana u ovom radu temelji se na rezultatima diplomskog rada Utjecaj lokacije obnovljivih izvora energije na ekonomsku isplativost [10]. U navedenom radu detaljno su obrađeni odabir i analiza lokacija, korišteni ulazni podaci, metodologija proračuna, provedeni tehnički i ekonomski proračuni te analiza dobivenih rezultata. Radi preglednosti, u ovom radu prikazani su samo ključni rezultati i zaključci, dok su cjelokupni proračuni i detaljna razrada dostupni u diplomskom radu.



Slika 1. Prikaz udaljenosti površina namjene P3 do 10kV kabela [7]

Pri odabiru najpovoljnije lokacije razmatrani su raspoloživa površina zemljišta, udaljenost do najbližeg 10 kV voda te udaljenost do najbliže transformatorske stanice 10/0,4 kV. Za izgradnju fotonaponske elektrane instalirane snage 1 MW potrebno je približno 2 ha (20 000 m²) raspoloživog zemljišta, zbog čega površina predstavlja osnovni kriterij pri odabiru lokacije. Udaljenost do 10 kV voda izravno utječe na duljinu priključnog voda i troškove priključenja na distribucijsku mrežu. Udaljenost do transformatorske stanice nije korištena kao odlučujući kriterij jer ne predstavlja izravan trošak investitora. Na temelju navedenih kriterija u uži izbor uvrštene su lokacije A8, A9, A11 i A12, dok su ostale površine isključene iz daljnje analize zbog nepovoljnijih prostornih i tehničkih obilježja. Tablica 1 sadrži podatke o površinama namjene P3.

Tablica 1. Površine namjene P3 s njihovim pripadajućim vrijednostima

Površina namjene P3	Površina [m^2]	Udaljenost do 10kV voda [m]	Udaljenost do prve trafostanice 10/0,4kV[m]
A8	98 281	20	2 145
A9	208 250	1 475	1 875
A11	111 703	762	2 312
A12	11 328	425	1 175

Na temelju podataka prikazanih u Tablici 1, lokacija A12 isključena je iz daljnje analize zbog nedovoljne površine za izgradnju planiranih fotonaponskih elektrana. Lokacija A9, iako raspolaže najvećom površinom, nalazi se na znatno većoj udaljenosti od postojećeg 10 kV voda, što povećava troškove priključenja. Usporedbom preostalih lokacija utvrđeno je da

lokacija A8 zadovoljava potrebne prostorne uvjete te ima najpovoljniji položaj u odnosu na postojeći 10 kV vod. Budući da 10 kV vod prolazi neposredno uz predmetnu površinu, duljina priključnog voda, a time i troškovi priključenja, najmanji su u odnosu na ostale razmatrane lokacije. Zbog navedenih tehničkih i ekonomskih prednosti lokacija A8 odabrana je za daljnju analizu.
Za potrebe analize usvojeno je stanje minimalnog opterećenja mreže, pri čemu je opterećenje svake transformatorske stanice postavljeno na 20 % instalirane snage uz faktor snage cosφ = 0,938, prema stvarnim mjerenjima operatora distribucijskog sustava. Početno stanje opterećenja izvoda i pripadajući radni gubici prije integracije fotonaponske elektrane prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2. Početno stanje opterećenja i radnih gubitaka 10 kV izvoda prije integracije fotonaponske elektrane

10kV izvod	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	P_{gubici} [kW]	Q_{gubici} [kVAr]
1.	647,00	239,00	690,00	14,19	-6,29
2.	589,00	218,00	628,00	6,73	-0,41
3.	803,00	297,00	856,00	21,61	10,93
Ukupno	2 039,00	754,00	2 174,00	42,53	4,26

Nakon odabira lokacije A8 provedena je analiza utjecaja instalirane snage fotonaponske elektrane na pogonske prilike distribucijske mreže, pri čemu su analizirani iznosi napona na sabirnicama i gubici u mreži. Analiza je provedena za slučaj maksimalne proizvodnje elektrane i minimalnog opterećenja sustava, kada postoji najveća mogućnost pojave prenapona, uz uvjet da naponi ostanu unutar dopuštenih granica propisanih normom EN 50160 [8]. Rezultati analize pokazali su da najveća dopuštena priključna snaga na odabranoj lokaciji iznosi 3,05 MW, pri čemu daljnje povećanje instalirane snage uzrokuje nepovoljne promjene naponskih prilika i povećanje gubitaka u mreži. Zbog toga u daljnjoj tehno-ekonomskoj analizi nisu razmatrane elektrane maksimalne priključne snage, već scenariji instalirane snage 1 MW i 2 MW.

4. Ekonomska analiza

Nakon određivanja najpovoljnije lokacije i provjere mogućnosti priključenja na distribucijsku mrežu provedena je ekonomska analiza fotonaponskih elektrana instalirane snage 1 MW i 2 MW. Analiza je provedena primjenom pokazatelja životnog ciklusa troška (LCC), niveliranog troška proizvedene električne energije (LCOE) i neto sadašnje vrijednosti (NPV). U proračun su uključeni investicijski troškovi, troškovi rada i održavanja, degradacija fotonaponskih modula te različiti modeli financiranja kako bi se procijenio njihov utjecaj na ekonomsku isplativost projekta

Tablica 3. prikazuje procijenjene investicijske troškove izgradnje i priključenja fotonaponske elektrane. Troškovnik obuhvaća izradu projektne dokumentacije, nabavu i ugradnju opreme, građevinske i elektroinstalaterske radove, izgradnju priključnog voda, transformatorske stanice i rasklopnog postrojenja te ostale troškove potrebne za realizaciju projekta. Sve cijene iskazane su bez PDV-a, dok trošak zemljišta nije uključen jer je zemljište u vlasništvu Općine Darda.

Tablica 3. Cjenik izgradnje solarne elektrane

Oprema za ostvarivanje uvjeta u mreži	
Rasklopno postrojenje 1 MW	30 000,00 €
Trafostanica 1 MVA	70 000,00 €
Rasklopno postrojenje 2 MW	60 000,00 €
Priključni vod (100m)	4 000,00 €
Solarna elektrana	
FN oprema	700 €/kW

Za potrebe ekonomske analize pretpostavljena je godišnja proizvodnja električne energije od 1 255,6 kWh/kW prema rezultatima alata PVGIS [11]. Prodajna cijena električne energije preuzeta je prema tržišnoj premiji HROTE-a te iznosi 82,04 €/MWh za fotonaponsku elektranu instalirane snage 1 MW, odnosno 67,05 €/MWh za elektranu instalirane snage 2 MW [12]. U proračunu je korišten životni vijek elektrane od 25 godina, realna diskontna stopa od 5 % te prosječna godišnja stopa inflacije od 2,5 %.
Za procjenu utjecaja pojedinih čimbenika na ekonomsku isplativost fotonaponskih elektrana analizirana su četiri modela različite razine složenosti. U prvom modelu razmatra se idealni slučaj bez troškova rada i održavanja te bez degradacije fotonaponskih modula. Drugi model uključuje godišnje troškove rada, održavanja i osiguranja elektrane. U trećem modelu dodatno je uzeta u obzir postupna degradacija fotonaponskih modula tijekom njihovog životnog vijeka. U četvrtom modelu analiziran je utjecaj financiranja investicije kreditom, pri čemu su razmatrani scenariji djelomičnog i potpunog kreditnog financiranja. Za svaki model usporedno su analizirane fotonaponske elektrane instalirane snage 1 MW i 2 MW primjenom pokazatelja LCC, LCOE i NPV.

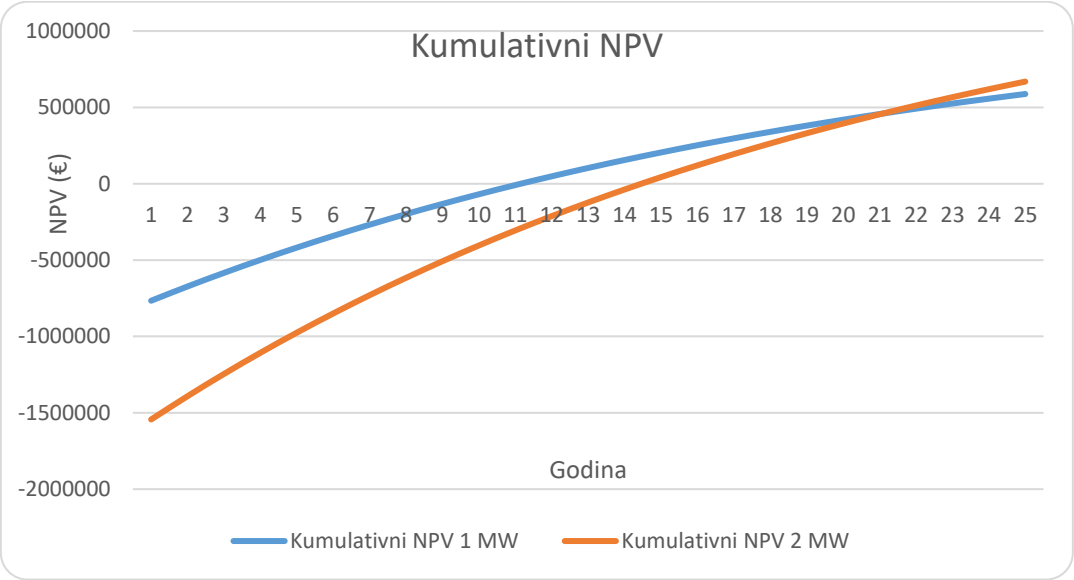
Slučaj 1 - Idealni scenarij
U idealnom scenariju pretpostavlja se da tijekom životnog vijeka fotonaponske elektrane nema troškova održavanja, zamjene opreme niti financiranja putem kredita. Ukupni trošak životnog vijeka (LCC) određen je prema izrazu (2-1), pri čemu se svodi na početno kapitalno ulaganje. Nakon toga prema izrazima (2-5) i (2-6) određeni su godišnja proizvodnja električne energije i godišnji prihodi od prodaje proizvedene električne energije, dok je neto

sadašnja vrijednost (NPV) izračunata prema izrazu (2-4). Dobivene vrijednosti LCC-a, NPV-a i godine povrata investicije za fotonaponske elektrane snage 1 MW i 2 MW prikazane su u Tablici 4., dok je kretanje kumulativne neto sadašnje vrijednosti tijekom životnog vijeka elektrane prikazano na Slici 2.

Tablica 4. Rezultati ekonomskih pokazatelja za idealni scenarij

Pokazatelj	**1 MW**	**2 MW**
LCC (€)	864 000,00	1 704 000,00
NPV (€)	587 809,06	669 081,45
Godina povrata investicije	11,15	14,45

Rezultati idealnog scenarija pokazuju da su obje analizirane fotonaponske elektrane ekonomski isplative jer ostvaruju pozitivnu neto sadašnju vrijednost (NPV). Elektrana instalirane snage 1 MW ostvaruje veći NPV u odnosu na uloženi kapital te postiže povrat investicije u 11,15. godina rada. Elektrana snage 2 MW također ostvaruje pozitivan NPV, no zbog većeg početnog ulaganja povrat investicije nastupa u 14,45 godina rada.



Slika 2. Kretanje kumulativne neto sadašnje vrijednosti (NPV) za fotonaponske elektrane snage 1 MW i 2 MW. Slučaj 1 – idealni scenariji

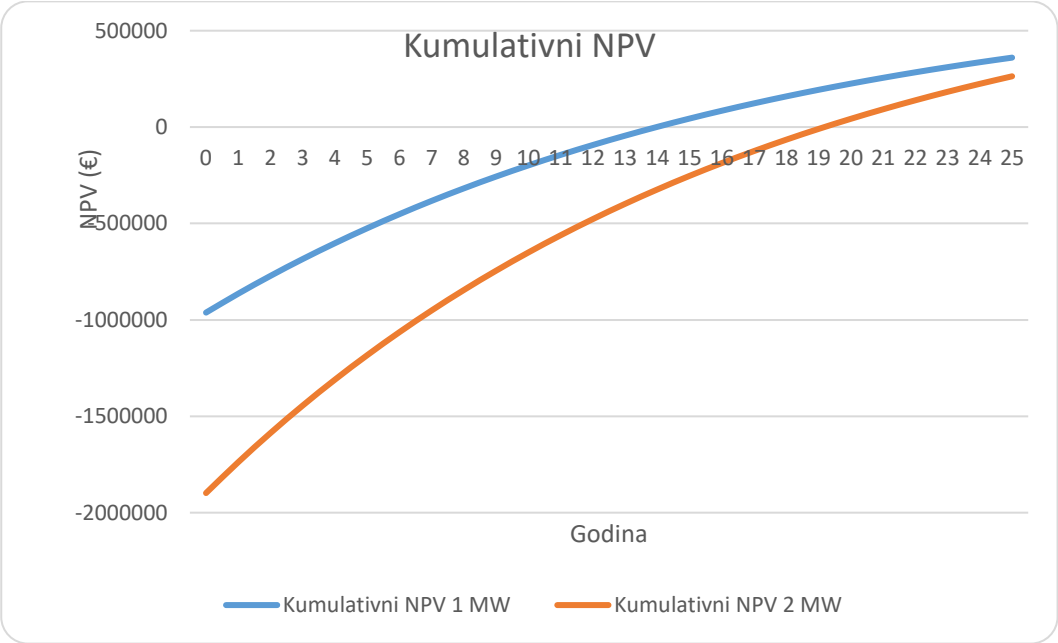
Slučaj 2 - Troškovi rada i održavanja

U drugom slučaju u izračun su uključeni godišnji troškovi održavanja, osiguranja i upravljanja u ukupnom iznosu od 1,5 % investicijske vrijednosti godišnje. Ukupni trošak životnog vijeka (LCC) određen je prema izrazu (2-1), pri čemu su u odnosu na idealni scenarij uključeni početno kapitalno ulaganje i godišnji troškovi rada i održavanja, dok su troškovi financiranja putem kredita, zamjene opreme i ostatna vrijednost na kraju životnog vijeka jednaki nuli. Nakon određivanja LCC-a prema izrazima (2-5) i (2-6) izračunati su godišnja proizvodnja

električne energije i godišnji prihodi, dok je neto sadašnja vrijednost (NPV) određena prema izrazu (2-4). Godina povrata investicije određena je kao prva godina u kojoj kumulativna neto sadašnja vrijednost postane pozitivna.

Tablica 5. Rezultati ekonomskih pokazatelja za slučaj s godišnjim troškovima održavanja, upravljanja i osiguranja

Pokazatelj	**1 MW**	**2 MW**
LCC (€)	1 046 657,52	2 064 241,23
NPV (€)	405 152,05	308 840,22
Godina povrata investicije	13,39	18,61



Slika 3. Kretanje kumulativne neto sadašnje vrijednosti (NPV) za fotonaponske elektrane snage 1 MW i 2 MW. Slučaj 2 - godišnji troškovi održavanja, upravljanja i osiguranja

Rezultati prikazani u Tablici 5. pokazuju da uključivanje godišnjih troškova održavanja, osiguranja i upravljanja povećava ukupni trošak životnog vijeka fotonaponske elektrane te smanjuje neto sadašnju vrijednost u odnosu na idealni scenarij. Posljedica povećanih troškova je produljenje vremena povrata investicije, koje iznosi 13,39 godina (Slika 3) za elektranu snage 1 MW, odnosno 18,61 godina za elektranu snage 2 MW. Unatoč tome, obje analizirane elektrane i dalje ostvaruju pozitivnu neto sadašnju vrijednost, što potvrđuje njihovu ekonomsku isplativost.

Slučaj 3 - Degradacija modula

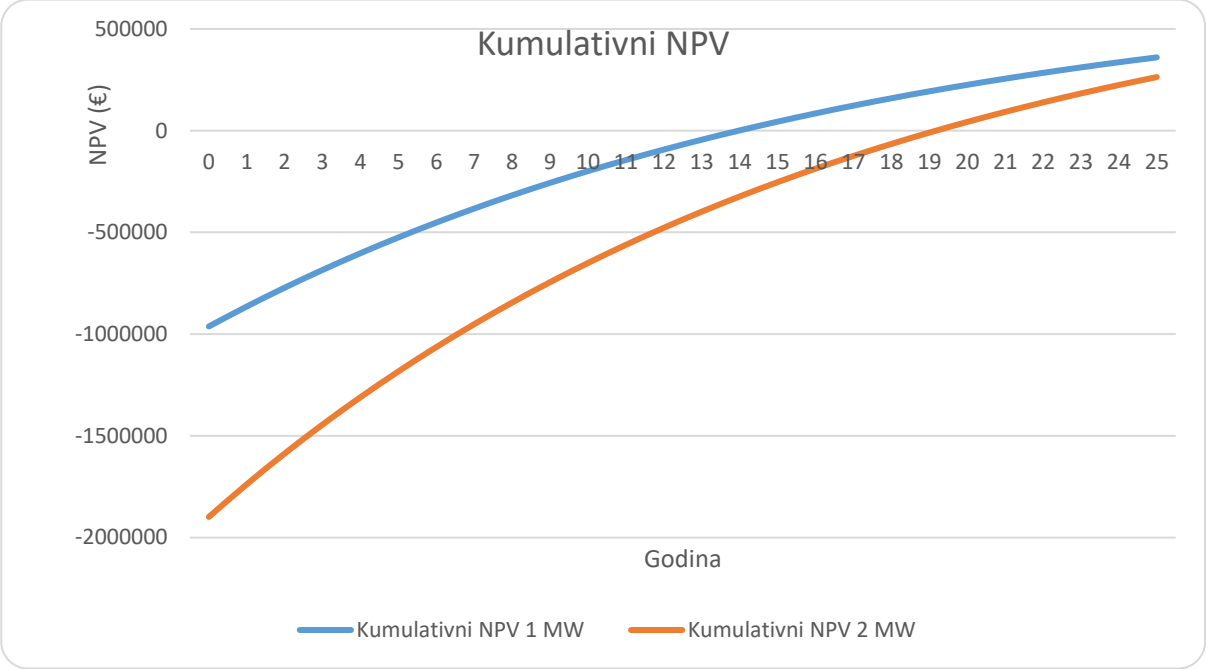
U trećem slučaju u ekonomsku analizu uključena je godišnja degradacija proizvodnje fotonaponskih modula od 1 %, koja predstavlja postupno smanjenje njihove učinkovitosti

tijekom eksploatacijskog vijeka. Ukupni trošak životnog vijeka (LCC) određen je prema izrazu (2-1) te obuhvaća početno ulaganje i sve diskontirane troškove održavanja, upravljanja, osiguranja i zamjene opreme. Nakon toga godišnja proizvodnja električne energije određena je prema izrazu (2-2), pri čemu se svake godine smanjuje za 1 % u odnosu na proizvodnju iz prethodne godine. Na temelju dobivenih godišnjih prihoda neto sadašnja vrijednost (NPV) izračunata je prema izrazu (2-4), dok je godina povrata investicije određena kao prva godina u kojoj kumulativna neto sadašnja vrijednost postane pozitivna. Rezultati prikazani u Tablici 6. pokazuju da uključivanje godišnje degradacije proizvodnje fotonaponskih modula smanjuje ekonomsku isplativost analiziranih projekata u odnosu na prethodni model. Budući da se proizvodnja električne energije svake godine smanjuje za 1 %, ostvareni prihodi postupno opadaju tijekom životnog vijeka elektrane, što rezultira nižom neto sadašnjom vrijednošću (NPV) i duljim razdobljem povrata investicije.

Tablica 6. Rezultati ekonomskih pokazatelja za model s degradacijom proizvodnje fotonaponskih modula

Pokazatelj	**1 MW**	**2 MW**
LCC (€)	1 046 657,52	2 064 241,23
NPV (€)	275 824,15	97 455,67
Godina povrata investicije	14,78	22,61

Povrat investicije ostvaren je u 14,78 godina za fotonaponsku elektranu snage 1 MW te u 22,61 godina za elektranu snage 2 MW (Slika 4). Unatoč smanjenju proizvodnje tijekom eksploatacijskog razdoblja, obje analizirane elektrane i dalje ostvaruju pozitivan NPV, čime je potvrđena njihova ekonomska isplativost.



Slika 4. Kretanje kumulativne neto sadašnje vrijednosti (NPV) za fotonaponske elektrane snage 1 MW i 2 MW. Slučaj 3 – degradacija proizvodnje fotonaponskih modula

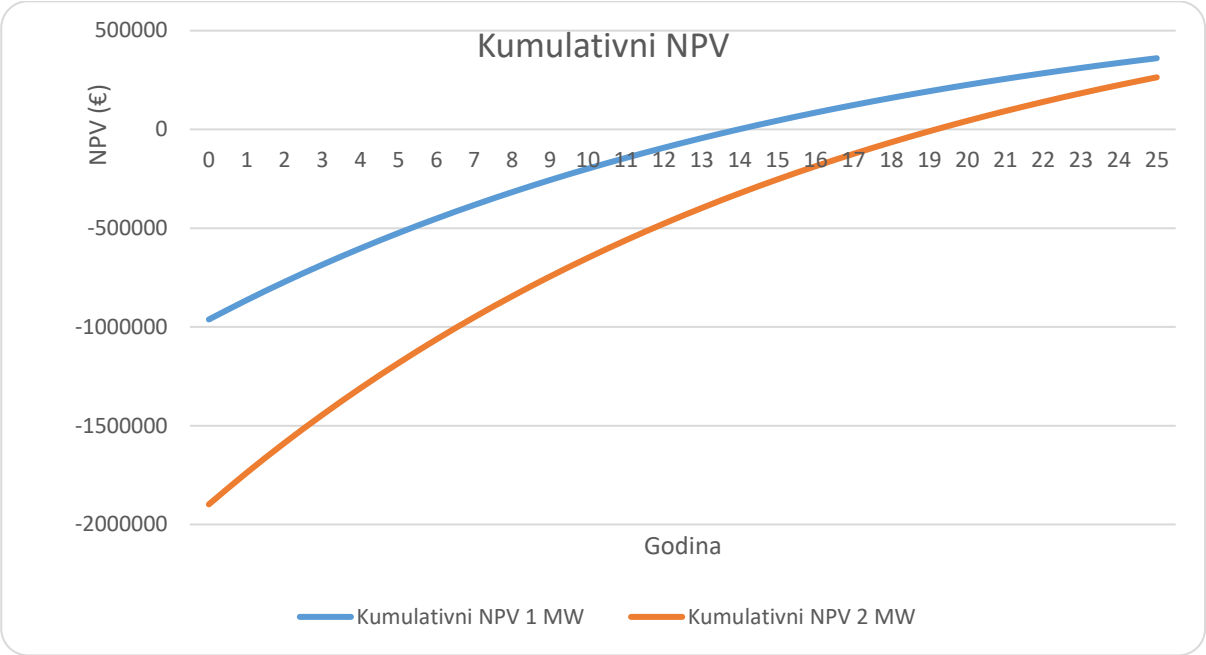
Slučaj 4 - Financiranje kreditom

U posljednjem slučaju analiziran je utjecaj financiranja investicije kreditom na ekonomsku isplativost fotonaponskih elektrana. Pretpostavljeno je da se 70 % investicije financira kreditom uz nominalnu kamatnu stopu od 5 %, prosječnu godišnju inflaciju od 2,5 % i rok otplate od 12 godina [10]. Ukupni trošak životnog vijeka (LCC) određen je prema izrazu (2-1), pri čemu su u obzir uzeti troškovi financiranja, održavanja, upravljanja, osiguranja i zamjene opreme. Diskontirana proizvodnja električne energije određena je prema izrazu (2-2), uz pretpostavljeno godišnje smanjenje proizvodnje od 1 %. Neto sadašnja vrijednost (NPV) izračunata je prema izrazu (2-4), dok je nivelirani trošak proizvedene električne energije (LCOE) određen prema izrazu (2-3). Godina povrata investicije određena je kao prva godina u kojoj kumulativna neto sadašnja vrijednost postane pozitivna.

Tablica 7. Rezultati ekonomskih pokazatelja za model financiranja kreditom

Pokazatelj	**1 MW**	**2 MW**
LCC (€)	962 224.35	1 898 282.22
NPV (€)	360 257.33	263 404.67
LCOE (€/MWh)	59.69	58.88
Godina povrata investicije	13,97	19,18

Rezultati prikazani u Tablici 7. pokazuju da financiranje dijela investicije kreditom dodatno poboljšava ekonomsku isplativost analiziranih projekata. Zbog raspodjele dijela investicijskog troška tijekom razdoblja otplate smanjuje se ukupni trošak životnog vijeka (LCC), što rezultira povećanjem neto sadašnje vrijednosti (NPV) u odnosu na prethodni model. Povrat investicije ostvaren je u 13,97 godina za fotonaponsku elektranu snage 1 MW te u 19,18 godina za elektranu snage 2 MW. Izračunate vrijednosti LCOE iznose 59,69 €/MWh za elektranu snage 1 MW i 58,88 €/MWh za elektranu snage 2 MW, što je niže od pretpostavljenih prodajnih cijena električne energije u oba analizirana slučaja. Time je potvrđena ekonomska opravdanost oba projekta, pri čemu elektrana snage 2 MW ostvaruje niži prosječni trošak proizvodnje električne energije.



Slika 5. Kretanje kumulativne neto sadašnje vrijednosti (NPV) za fotonaponske elektrane snage 1 MW i 2 MW. Slučaj 4 – financiranje kreditom

Usporedba gubitaka

Iz Tablice 8. vidljivo je da integracija fotonaponske elektrane snage 2 MW uzrokuje znatno veću radnu i jalovu snagu gubitaka u odnosu na elektranu snage 1 MW, ponajprije na prvom 10 kV izvodu na koji je elektrana priključena. Razlog tomu je što proizvodnja elektrane znatno premašuje lokalnu potrošnju, zbog čega se veći dio proizvedene električne energije prenosi prema udaljenijim dijelovima distribucijske mreže, što rezultira povećanjem gubitaka.

Tablica 8. Snaga radnih i jalovih gubitaka pri najmanjem opterećenju sustava

10 kV izvod	1 MW FN elektrana		2 MW FN elektrana	
	***P*gubici [kW]**	***Q*gubici [kVAr]**	***P*gubici [kW]**	***Q*gubici [kVAr]**
1.	27.36	3.93	140.25	49.46
2.	6.68	-0.73	6.64	-0.73
3.	21.32	10.70	21.06	10.53
Ukupno	**55.06**	**13.90**	**167.95**	**59.26**

5. Zaključak

U radu je provedena tehno-ekonomska analiza fotonaponskih elektrana instalirane snage 1 MW i 2 MW s ciljem procjene njihove tehničke izvedivosti i ekonomske isplativosti. Analiza je obuhvatila odabir najpovoljnije lokacije, procjenu utjecaja priključenja na distribucijsku mrežu te ekonomsku usporedbu različitih scenarija koji uključuju idealne uvjete, godišnje troškove održavanja, degradaciju proizvodnje fotonaponskih modula i financiranje investicije kreditom. Analizom raspoloživih površina utvrđeno je da lokacija A8 predstavlja najpovoljnije rješenje za izgradnju fotonaponske elektrane. Odabrana lokacija zadovoljava potrebnu površinu za elektranu snage do 2 MW te, zbog neposredne blizine postojećeg 10 kV voda, omogućuje najniže troškove priključenja. Iako analiza naponskih prilika pokazuje da je tehnički moguć priključak elektrane snage oko 3 MW, zbog povećanih gubitaka u mreži daljnja analiza ograničena je na elektrane snage 1 MW i 2 MW. Rezultati ekonomske analize pokazuju da oba projekta ostvaruju pozitivnu neto sadašnju vrijednost (NPV) u svim razmatranim scenarijima. Uključivanjem godišnjih troškova održavanja, upravljanja i osiguranja te godišnje degradacije proizvodnje od 1 % dolazi do povećanja ukupnog troška životnog vijeka (LCC), smanjenja NPV-a i produljenja razdoblja povrata investicije. Unatoč tome, elektrana snage 1 MW zadržava veću otpornost na nepovoljne uvjete zahvaljujući višoj ugovorenoj otkupnoj cijeni električne energije. Analizom financiranja investicije kreditom uz omjer duga i vlastitog kapitala 70/30, rok otplate od 12 godina i realnu kamatnu stopu od 2,43 % utvrđeno je povećanje neto sadašnje vrijednosti u odnosu na scenarij financiranja vlastitim sredstvima. Ostvareni NPV iznosi 360 257,33 € za elektranu snage 1 MW te 263 404,67 € za elektranu snage 2 MW, dok diskontirani rok povrata iznosi približno 14 godina za elektranu snage 1 MW, odnosno 19,18 godina za elektranu snage 2 MW. Izračunate vrijednosti niveliranog troška proizvedene električne energije iznose 59,69 €/MWh za elektranu snage 1 MW i 58,88 €/MWh za elektranu snage 2 MW, što je niže od pretpostavljenih prodajnih cijena električne energije u oba analizirana slučaja. Može se zaključiti da je fotonaponska elektrana snage 1 MW ekonomski otpornija na promjene ulaznih pretpostavki zbog povoljnije otkupne cijene električne energije, dok elektrana snage 2 MW ostvaruje niži nivelirani trošak proizvodnje električne energije, ali pokazuje veću osjetljivost na povećanje troškova i smanjenje prihoda. Rezultati potvrđuju da konačna

isplativost fotonaponskih elektrana ne ovisi isključivo o njihovoj instaliranoj snazi, nego i o uvjetima priključenja na mrežu, modelu financiranja, otkupnoj cijeni električne energije i dugoročnim uvjetima eksploatacije.

6. Literatura

[1] R. Messenger, J. Ventre, Photovoltaic Systems Engineering, CRC Press, Boca Raton, 2017.

[2] A. Borbely, J. F. Kreider, Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium, CRC Press, Boca Raton, 2001.

[3] C. S. Solanki, Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Applications, Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2010.

[4] L. Blank, A. Tarquin, Engineering Economy, 7. izdanje, McGraw-Hill, New York, 2012. Pristupljeno 17.05.2025. Dostupno na: https://razak.utm.my/shamsul/wp-content/uploads/sites/189/2016/03/Engineering-Economy.pdf

[5] D. Šljivac, B. Nakomčić-Smaragdakis, M. Vukobratović, D. Topić, Z. Čepić, Cost-Benefit Comparison of On-grid Photovoltaic Systems in Pannonian Parts of Croatia and Serbia, Tehnički vjesnik 21(5), 2014. Pristupljeno 17.08.2025. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/259290542_Cost-benefit_Comparison_of_On-grid_Photovoltaic_Systems_In_Pannonian_Parts_of_Croatia_and_Serbia

[6] D. P. Goldman, J. J. McKenna, L. M. Murphy, Financing Projects That Use Clean-Energy Technologies: An Overview of Barriers and Opportunities, Technical Report NREL/TP-600-38723, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2005. Pristupljeno 28.08.2025. Dostupno na: https://docs.nrel.gov/docs/fy06osti/38723.pdf

[7] Zavod za prostorno uređenje Osječko-baranjske županije, Pregledna karta izmjena i dopuna, web dokument, 2022, pristupljeno 28.05.2025. Dostupno na: https://prostorobz.hr/wp-content/uploads/2023/01/0_pl_PREGLEDNA-KARTA-ID.pdf

[8] HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o., Prijedlog Mrežna pravila distribucijskog sustava, dokument HEP ODS, 24. svibnja 2017. Pristupljeno 03.09.2025. Dostupno na: https://www.hep.hr/ods/UserDocsImages/dokumenti/Javne_rasprave/prijedlog_mreznih_pravila/prijedlog_Mrezna_pravila_distribucijskog_sustava.pdf

[9] Državni zavod za statistiku, Indeksi potrošačkih cijena, https://podaci.dzs.hr/hr/podaci/cijene/indeks-potrosackih-cijena/, 2025, pristupljeno 05.05.2025

[10] K. Denis, Utjecaj lokacije obnovljivih izvora energije na ekonomsku isplativost, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2025. Pristupljeno 5.06.2026. Dostupno na: https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A5872

[11] European Commission – Joint Research Centre, PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) – PVGIS Tools, web-stranica, pristupljeno 17.08.2025. Dostupno na: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

[12] Hrvatski operator tržišta energije, HROTE, Odluka – Javni natječaj br. 06/2024, pdf dokument, 25. srpnja 2024. Pristupljeno 20.08.2025. Dostupno na: https://files.hrote.hr/files/PDF/OIEIK/2024/Javni_natjecaj_06_2024/Odluka_sken.pdf

Utjecaj toplinskih mostova na proračun projektnog toplinskog opterećenja obiteljskih kuća
Impact of Thermal Bridges on Design Heating Load Calculations in Single-Family Houses

M. Đuranović[1,*], D. Ćaćić[1] , M. Damjanović[1], V. Damičević[1], M. Stojkov[1], M. Živić[1]

[1]Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, University of Slavonski Brod, Croatia

[*] Corresponding Author. E-mail: mduranovic@unisb.hr

Sažetak
Toplinski mostovi predstavljaju značajan čimbenik koji utječe na transmisijske toplinske gubitke građevina te posljedično na projektno toplinsko opterećenje zgrade. U radu je analiziran utjecaj različitih metoda modeliranja toplinskih mostova na projektno toplinsko opterećenje dviju obiteljskih kuća smještenih u Slavonskom Brodu. Proračun je proveden prema normi HRN EN 12831, pri čemu su ukupni toplinski gubici određeni kao zbroj transmisijskih i ventilacijskih toplinskih gubitaka. Utjecaj toplinskih mostova analiziran je primjenom pojednostavljenog pristupa prema HRN EN 12831 i detaljnog određivanja linearnih koeficijenata prolaza topline prema HRN EN ISO 14683. Rezultati pokazuju da detaljno modeliranje toplinskih mostova dovodi do povećanja procijenjenog projektnog toplinskog opterećenja u odnosu na pojednostavljeni pristup. Dodatno je analizirana primjena korekcijskog dodatka ΔU_{TB} = 0,15 W/(m²K), pri čemu su dobiveni rezultati pokazali vrlo dobro podudaranje s detaljnim proračunom. Dobiveni rezultati potvrđuju važnost uključivanja toplinskih mostova u proračun projektnog toplinskog opterećenja te ukazuju na mogućnost primjene jednostavnijih proračunskih postupaka uz zadovoljavajuću točnost.

Ključne riječi: toplinski mostovi, projektno toplinsko opterećenje, HRN EN 12831, HRN EN ISO 14683, obiteljske kuće.

Abstract
Thermal bridges are a significant factor affecting transmission heat losses in buildings and, consequently, the design heating load of buildings. This paper analyzes the influence of different thermal bridge modelling methods on the design heating load of two single-family houses located in Slavonski Brod, Croatia. The calculations were performed in accordance with HRN EN 12831, with total heat losses determined as the sum of transmission and ventilation heat losses. The influence of thermal bridges was assessed using a simplified approach according to HRN EN 12831 and a detailed method based on linear thermal transmittance coefficients according to HRN EN ISO 14683. The results show that detailed

thermal bridge modelling leads to higher estimated design heating loads compared to the simplified approach. In addition, the application of a correction factor of ΔU_{TB} = 0.15 W/(m²K) showed very good agreement with the detailed calculations. The findings confirm the importance of including thermal bridges in design heating load calculations and indicate that simplified approaches can provide satisfactory accuracy for practical engineering applications.

Keywords: thermal bridges, design heating load, HRN EN 12831, HRN EN ISO 14683, single-family houses.

1. Uvod

Smanjenje potrošnje energije u zgradarstvu jedan je od ključnih ciljeva suvremenog projektiranja i gradnje građevina. U sektoru zgradarstva značajan udio ukupne potrošnje energije otpada na grijanje i hlađenje prostora, zbog čega je pravilna procjena toplinskih gubitaka od iznimne važnosti za dimenzioniranje sustava grijanja te postizanje energetske učinkovitosti i toplinske ugodnosti korisnika. Projektno toplinsko opterećenje predstavlja osnovni parametar pri odabiru izvora topline i dimenzioniranju elemenata sustava grijanja, a njegova točnost izravno ovisi o preciznosti procjene transmisijskih i ventilacijskih toplinskih gubitaka [1].

Jedan od čimbenika koji može značajno utjecati na transmisijske toplinske gubitke građevine jesu toplinski mostovi. Toplinski mostovi predstavljaju lokalna područja građevinske ovojnice kroz koja dolazi do povećanog prolaza topline uslijed promjene geometrije konstrukcije, prekida toplinske izolacije ili spojeva različitih građevinskih elemenata. Osim povećanja toplinskih gubitaka, toplinski mostovi mogu uzrokovati snižavanje unutarnjih površinskih temperatura, pojavu kondenzacije te smanjenje toplinske ugodnosti korisnika [2]. Brojna istraživanja pokazuju da zanemarivanje toplinskih mostova može dovesti do podcjenjivanja transmisijskih toplinskih gubitaka i potrebne energije za grijanje. Posebno značajan utjecaj imaju spojevi balkona, međukatnih konstrukcija i vanjske ovojnice, pri čemu toplinski mostovi u suvremenim dobro izoliranim građevinama mogu činiti više od 30 % ukupnih toplinskih gubitaka kroz ovojnicu [2–4].

U europskoj projektantskoj praksi toplinski mostovi najčešće se uzimaju u obzir primjenom normi HRN EN 12831 i HRN EN ISO 14683 [1,5]. Norma HRN EN 12831 omogućuje uključivanje toplinskih mostova primjenom dodatnog korekcijskog koeficijenta prolaza topline, dok norma HRN EN ISO 14683 omogućuje detaljnije određivanje njihovog utjecaja primjenom linearnih koeficijenata prolaza topline za pojedine konstrukcijske spojeve. Iako je pojednostavljeni pristup jednostavniji za primjenu, detaljnije metode omogućuju precizniju procjenu transmisijskih toplinskih gubitaka i projektnog toplinskog opterećenja. Cilj rada je usporediti utjecaj pojednostavljenog pristupa prema HRN EN 12831 i detaljnog modeliranja toplinskih mostova prema HRN EN ISO 14683 na projektno toplinsko opterećenje adaptirane i novoizgrađene obiteljske kuće.

2. Karakteristike promatranih obiteljskih kuća

Istraživanje je provedeno na dvije obiteljske kuće smještene u Slavonskom Brodu, gradu u istočnom dijelu Republike Hrvatske.

Prva promatrana građevina je adaptirana obiteljska kuća ukupne stambene površine 130 m², koja se sastoji od prizemlja i kata. U prizemlju su smješteni dnevni boravak povezan s kuhinjom i blagovaonicom, hodnik, toalet te spremište koje se u ovom radu promatra kao negrijani prostor. Na katu se nalaze tri spavaće sobe, hodnik i kupaonica. Građevina sadrži i balkone koji predstavljaju značajne konstrukcijske elemente pri analizi toplinskih mostova odnosno transmisijskih toplinskih gubitaka. Vanjski zidovi imaju koeficijente prolaza topline u rasponu od 0,168 do 0,248 W/(m²K), što je posljedica ugradnje toplinske izolacije od ekspandiranog polistirena debljine 15 cm. Vrijednosti koeficijenata prolaza topline unutarnjih zidova kreću se od 0,475 do 1,168 W/(m²K). Koeficijent prolaza topline poda na tlu iznosi 0,241 W/(m²K), koeficijent prolaza topline stropa prema krovu 0,113 W/(m²K), dok koeficijent prolaza topline međukatne konstrukcije iznosi 0,404 W/(m²K). Prozori su izvedeni s troslojnim ostakljenjem i PVC okvirom te imaju koeficijent prolaza topline 0,9 W/(m²K). Koeficijent prolaza topline vanjskih vrata iznosi 1,25 W/(m²K), dok za unutarnja vrata iznosi 1,8 W/(m²K).

Druga promatrana građevina je novoizgrađena obiteljska kuća stambene površine 160 m², također izvedena na dvije etaže. U prizemlju se nalazi dnevni boravak otvorenog koncepta povezan s kuhinjom, kupaonica, soba za goste, spremište i vjetrobran. Na katu su smještene tri spavaće sobe, od kojih jedna ima pripadajući garderobni prostor (walk-in ormar), dok dvije sobe imaju izlaz na balkon. Osim toga, na katu se nalaze kupaonica, vešeraj te tehnička prostorija predviđena za smještaj opreme za grijanje i pripremu potrošne tople vode. Za drugu građevinu korišteni su koeficijenti prolaza topline od 0,18 W/(m²K) za vanjske zidove, 1,81 W/(m²K) za unutarnje zidove, 0,16 W/(m²K) za strop prema krovu, 0,45 W/(m²K) za međukatnu konstrukciju te 0,22 W/(m²K) za pod prema tlu. Prozori i vanjska PVC vrata imaju koeficijent prolaza topline 0,9 W/(m²K), dok koeficijent prolaza topline unutarnjih vrata iznosi 2,9 W/(m²K).

3. Metodologija proračuna projektnog toplinskog opterećenja prema normi HRN EN 12831

Norma HRN EN 12831 definira postupak za određivanje projektnog toplinskog opterećenja zgrada, odnosno potrebne toplinske snage sustava grijanja kojom se mogu održavati zadane unutarnje projektne temperature pri projektno najnepovoljnijim vanjskim klimatskim uvjetima. Svrha norme je omogućiti jednoznačan i tehnički utemeljen proračun toplinskih gubitaka građevine, koji predstavlja osnovu za pravilno dimenzioniranje sustava grijanja i pripadajuće opreme.

Transmisijski toplinski gubici određuju se za svaku prostoriju zasebno na temelju površina građevinskih elemenata, njihovih toplinskih karakteristika i graničnih uvjeta prema okolišu, negrijanim prostorima, tlu ili susjednim grijanim prostorima.

Ventilacijski toplinski gubici nastaju zbog potrebe za dovođenjem svježeg zraka u prostorije te zbog nekontrolirane infiltracije zraka kroz spojeve, prozore i vrata. Njihova veličina ovisi o količini zraka koja ulazi u prostoriju, svojstvima zraka te temperaturnoj razlici između unutarnje i vanjske projektne temperature. Ventilacijski gubici imaju važnu ulogu u određivanju ukupnog toplinskog opterećenja, osobito u objektima s većim potrebama za izmjenom zraka.
Za određivanje projektnog toplinskog opterećenja korišteni su klimatski podaci za lokaciju Slavonski Brod. Sukladno dokumentu „Meteorološki podaci – primjenjuju se od 1. siječnja 2016.", izdanom od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ), projektna vanjska temperatura za Slavonski Brod iznosi −16,4 °C. Unutarnje projektne temperature određene su prema namjeni pojedinih prostorija. Za dnevne boravke, blagovaonice, kuhinje, spavaće sobe i sanitarne prostorije (toalete) usvojena je unutarnja projektna temperatura od 20 °C. Za kupaonice je zbog zahtjeva toplinske ugodnosti korištena viša unutarnja projektna temperatura od 24 °C, dok je za hodnike usvojena temperatura od 15 °C.

3.1. Transmisijski toplinski gubici prema normi HRN EN 12831

Projektni transmisijski toplinski gubici za pojedinu prostoriju određuju se izrazom:

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij})(\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) \quad \textbf{(1)}$$

gdje je:

$H_{T,ie}$– koeficijent transmisijskog gubitka prema vanjskom okolišu, W/K,

$H_{T,iue}$– koeficijent transmisijskog gubitka kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu, W/K,

$H_{T,ig}$– koeficijent transmisijskog gubitka prema tlu, W/K,

$H_{T,ij}$– koeficijent transmisijskog gubitka prema susjednom grijanom prostoru različite temperature,W/K,

$\vartheta_{int,i}$– unutarnja projektna temperatura prostorije,°C,

ϑ_e– vanjska projektna temperatura,°C,

Ukupni transmisijski toplinski gubici prostorije određuju se zbrajanjem gubitaka prema vanjskom okolišu, negrijanim prostorima, tlu i susjednim grijanim prostorima na nižu temperaturu.

4. Modeliranje toplinskih mostova

U ovom radu utjecaj toplinskih mostova analiziran je primjenom dva različita pristupa propisana važećim normama. Prvi pristup temelji se na pojednostavljenoj metodi definiranoj

normom HRN EN 12831-1:2017, pri čemu se utjecaj toplinskih mostova uključuje povećanjem koeficijenta prolaza topline za dodatni koeficijent ΔU_{TB}.
Vrijednost koeficijenta prolaza topline odabire se prema kvaliteti izvedbe građevine i razini smanjenja toplinskih mostova. Za nove zgrade s vrlo visokom razinom toplinske izolacije i dokazano minimiziranim toplinskim mostovima preporučena vrijednost dodatnog koeficijenta iznosi $\Delta U_{\mathrm{TB}} = 0{,}02\ \mathrm{W/(m^2K)}$. Za nove zgrade izvedene u skladu s općeprihvaćenim pravilima struke vezanim uz smanjenje toplinskih mostova koristi se vrijednost $\Delta U_{\mathrm{TB}} = 0{,}05\ \mathrm{W/(m^2K)}$. Za građevine s pretežno unutarnjom toplinskom izolacijom prekinutom masivnim konstrukcijskim elementima, poput armiranobetonskih stropova, preporučena vrijednost iznosi $\Delta U_{\mathrm{TB}} = 0{,}15\ \mathrm{W/(m^2K)}$. Za sve ostale građevine koristi se vrijednost $\Delta U_{\mathrm{TB}} = 0{,}10\ \mathrm{W/(m^2K)}$.
Primjenom ove metode toplinski mostovi uključuju se u proračun na način da se koeficijent prolaza topline svakog građevinskog elementa kod kojeg postoji mogućnost pojave toplinskih mostova povećava za odgovarajuću vrijednost ΔU_{TB}. Tako korigirani koeficijenti prolaza topline koriste se pri određivanju transmisijskih toplinskih gubitaka prema normi HRN EN 12831-1. Prednost ove metode je jednostavnost primjene i mali broj potrebnih ulaznih podataka, zbog čega je pogodna za brze procjene projektnog toplinskog opterećenja zgrade.
Drugi pristup temelji se na normi HRN EN ISO 14683:2017. Ova metoda omogućuje detaljnije modeliranje toplinskih mostova primjenom linearnih koeficijenata prolaza topline za pojedine konstrukcijske spojeve. Norma sadrži zadane vrijednosti linearnih koeficijenata prolaza topline za različite tipove toplinskih mostova, kao što su spojevi vanjskih zidova i međukatnih konstrukcija, spojevi vanjskih zidova i krova, spojevi zidova i poda prema tlu, balkonske ploče, nadvoji, prozorski i vratni otvori te drugi karakteristični detalji građevinske ovojnice.
Primjenom norme HRN EN ISO 14683 moguće je pojedinačno odrediti doprinos svakog toplinskog mosta ukupnim transmisijskim toplinskim gubicima građevine. Takav pristup omogućuje precizniju procjenu projektnog toplinskog opterećenja u odnosu na metodu dodatnog koeficijenta prolaza topline, ali zahtijeva detaljno poznavanje geometrije građevine i svih karakterističnih konstrukcijskih spojeva. U ovom radu rezultati dobiveni primjenom pojednostavljene metode prema HRN EN 12831-1 uspoređeni su s rezultatima dobivenim detaljnijim proračunom toplinskih mostova prema HRN EN ISO 14683 kako bi se procijenio njihov utjecaj na projektno toplinsko opterećenje promatranih obiteljskih kuća.

4.1. Određivanje linearnih koeficijenata toplinskih mostova prema HRN EN ISO 14683

Norma HRN EN ISO 14683:2017 sadrži katalog karakterističnih toplinskih mostova te pripadajuće vrijednosti linearnih koeficijenata prolaza topline ψ za najčešće konstrukcijske spojeve u zgradama. Navedene vrijednosti određene su za unaprijed definirane geometrijske i toplinske karakteristike građevinskih elemenata, uključujući referentne debljine zidova, podova i stropova, toplinske otpore unutarnje i vanjske površine te zadane vrijednosti koeficijenata prolaza topline pojedinih konstrukcija.

Budući da se koeficijenti prolaza topline promatranih građevina razlikuju od referentnih vrijednosti korištenih u normi HRN EN ISO 14683, provedena je prilagodba normiranih linearnih koeficijenata toplinskih mostova. Korekcija je provedena primjenom omjera stvarnog i referentnog koeficijenta prolaza topline, čime su dobivene prilagođene vrijednosti koje bolje opisuju stvarni prijenos topline kroz karakteristične konstrukcijske spojeve promatranih građevina.

Postupak osrednjavanja vrijednosti toplinskih mostova proveden je na temelju usporedbe izračunatih koeficijenata prolaza topline pojedinih građevinskih elemenata s referentnim vrijednostima danima u normi. Za svaki promatrani element određen je omjer stvarne (U) i normirane vrijednosti koeficijenta prolaza topline (U_n), koji je zatim korišten kao korekcijski faktor. Na taj su način normirane vrijednosti koeficijenata toplinskih mostova (ψ_n) preračunate i prilagođene stvarnim toplinskim karakteristikama (ψ) promatranog stambenog objekta.

$$\psi = \psi_n \cdot \frac{U}{U_n} \qquad \textbf{(2)}$$

Takav pristup omogućuje zadržavanje jednostavnosti primjene normiranih vrijednosti iz HRN EN ISO 14683, uz istodobno uvažavanje specifičnih toplinskih karakteristika promatrane građevine. Dobivene prilagođene vrijednosti linearnih koeficijenata toplinskih mostova korištene su u daljnjem proračunu transmisijskih toplinskih gubitaka i projektnog toplinskog opterećenja.

5. Rezultati analize utjecaja toplinskih mostova na projektno toplinsko opterećenje

Kako bi se procijenio utjecaj toplinskih mostova na projektno toplinsko opterećenje promatranih građevina, provedena je usporedba pojednostavljenog pristupa prema HRN EN 12831-1 i detaljnog modeliranja prema HRN EN ISO 14683. Rezultati proračuna prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Utjecaj načina modeliranja toplinskih mostova na ukupno toplinsko opterećenje promatranih građevina

Građevina	Ukupno projektno toplinsko opterećenje, W	
	$\Delta U_{\mathrm{TB}} = 0{,}05$ ili $0{,}10$ prema HRN EN 12831	Detaljni proračun prema HRN EN ISO 14683
Objekt 1 (adaptirana kuća)	7131	7643
Objekt 2 (nova kuća)	8050	9095

Detaljno modeliranje toplinskih mostova povećalo je procijenjeno projektno toplinsko opterećenje sa 7131 W na 7643 W za adaptiranu kuću te s 8050 W na 9095 W za novoizgrađenu kuću, što predstavlja povećanje od 7,2 % odnosno 13 %. Dodatno je proveden proračun primjenom korekcijskog dodatka ΔU_{TB} = 0,15 W/(m²K), pri čemu su dobivene vrijednosti od 7772 W i 9258 W. Usporedba s detaljnim proračunom pokazala je odstupanja manja od 2 %, što upućuje na mogućnost primjene povećanog korekcijskog dodatka kao prihvatljivog pojednostavljenja.

6. Zaključak

Rezultati pokazuju da detaljnije modeliranje toplinskih mostova povećava procijenjeno projektno toplinsko opterećenje u odnosu na pojednostavljeni pristup. Povećanje je iznosilo 7,2 % za adaptiranu kuću i 13 % za novoizgrađenu kuću, pri čemu je utjecaj toplinskih mostova bio izraženiji kod bolje toplinski izolirane građevine.

Analiza je također pokazala da primjena korekcijskog dodatka ΔU_{TB} = 0,15 W/(m²K) daje rezultate vrlo bliske detaljnom proračunu prema HRN EN ISO 14683. Zbog toga se navedeni pristup može smatrati prihvatljivim pojednostavljenjem u fazama projektiranja kada detaljni podaci o svim konstrukcijskim spojevima nisu dostupni.

Rezultati istraživanja potvrđuju važnost uključivanja toplinskih mostova u proračun projektnog toplinskog opterećenja kako bi se osiguralo pouzdano dimenzioniranje sustava grijanja i izbjeglo podcjenjivanje potrebne toplinske snage. Dobiveni zaključci mogu poslužiti kao smjernice projektantima pri odabiru odgovarajuće metode za procjenu utjecaja toplinskih mostova u obiteljskim kućama.

7. Zahvala

Ovaj znanstveni rad financiralo je Sveučilište u Slavonskom Brodu u sklopu institucionalnog istraživačkog projekta Napredno modeliranje i optimizacija kompaktnih izmjenjivača topline za integraciju u sustave obnovljivih izvora energije (MOKIT), financiranog sredstvima Europske unije – NextGenerationEU. Izneseni stavovi i mišljenja samo su autorova i ne odražavaju nužno službena stajališta Europske unije ili Europske komisije. Ni Europska unija ni Europska komisija ne mogu se smatrati odgovornima za njih.

8. Literatura

[1] HRN EN 12831-1:2017. *Energetska svojstva zgrada* – Metoda proračuna projektnog toplinskog opterećenja – Dio 1: Projektno toplinsko opterećenje prostora. Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2017.

[2] Theodosiou, T. G., Papadopoulos, A. M. The Impact of Thermal Bridges on the Energy Demand of Buildings with Double Brick Wall Constructions // *Energy and Buildings*, 40 (2008), 11; 2083–2089. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.06.006

[3] Ge, H., McClung, V. R., Zhang, S. Impact of Balcony Thermal Bridges on the Overall Thermal Performance of Multi-Unit Residential Buildings: A Case Study // *Energy and Buildings,* 60(2013); 163–173. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.004

[4] Pérez-Carramiñana, C., Morena-Marqués, A., González-Avilés, A. B., Castilla, N., Galiano-Garrigós, A. Influence of Balcony Thermal Bridges on Energy Efficiency of Dwellings in a Warm Semi-Arid Dry Mediterranean Climate// *Buildings*, 14(2024), 3; 703. DOI: 10.3390/buildings14030703

[5] HRN EN ISO 14683:2017. Toplinski mostovi u zgradama – Linearni koeficijenti prolaska topline – Pojednostavljene metode i zadane vrijednosti. Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2017.

Ekonomska analiza isplativosti FN elektrana u modelu prema količini preuzete i predane energije u Hrvatskoj od 2026. godine

Economic analysis of the profitability of PV power plants in the model according to the amount of energy received and delivered in Croatia from 2026

M. Bošnjaković[1], M. Stoić[1,*], M. Čuletić Čondrić, A. Stoić[2]

[1]Tehnički odjel, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska
[2]Strojarski fakultet, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: mstoic@unisb.hr

Sažetak

Globalni elektroenergetski sustav prolazi kroz tranziciju od centraliziranih modela prema decentraliziranim sustavima u kojima kućanstva preuzimaju ulogu aktivnih sudionika na tržištu električne energije. S ulaskom u 2026. godinu, hrvatsko tržište napušta dosadašnji model neto mjerenje (*net-metering)* i prelazi na model neto obračuna (*net-billing)*, što bitno mijenja ekonomsku logiku ulaganja u fotonaponske (FN) sustave.

Rad analizira isplativost ulaganja u FN elektrane za kućanstva u novim regulatornim uvjetima. Kroz višescenarijsku analizu, rad istražuje utjecaj različitih faktora na razdoblje povrata investicije (ROI), uključujući usporedbu sustava sa i bez baterijskih spremnika, analizu utjecaja različitih omjera dnevne samopotrošnje na isplativost sustava te utjecaj dvotarifnih modela i strukture tarifnih stavki na ekonomsku održivost.

Rezultati istraživanja ukazuju na to da, iako novi model obračuna usporava povrat investicije u odnosu na ranije razdoblje, fotonaponski sustavi ostaju isplativi uz pravilno dimenzioniranje i optimizaciju vlastite potrošnje uz dodavanje baterija za skladištenje viška proizvedene električne energije te sustava za pametno upravljanje energijom. Također, rezultati pokazuju da se umjesto maksimalne proizvodnje fokus treba staviti na maksimalnu vlastitu potrošnju (samopotrošnju) uz pametno upravljanje energijom. Rad pruža konkretne smjernice investitorima za donošenje optimalnih odluka u novom regulatornom okruženju.

Ključne riječi: fotonaponski sustavi, neto obračun, baterijski sustavi, isplativost investicije

Abstract

The global electricity system is undergoing a transition from centralized models to decentralized systems in which households take on the role of active participants in the electricity market. By entering 2026, the Croatian market will abandon the current net-

metering model and switch to a net-billing model, which significantly changes the economic logic of investing in photovoltaic (PV) systems.
The paper analyzes the profitability of investing in PV power plants for households under the new regulatory conditions. Through a multi-scenario analysis, the paper explores the impact of various factors on the return on investment (ROI), including a comparison of systems with and without battery storage, an analysis of the impact of different daily self-consumption ratios on the profitability of the system, and the impact of two-tariff models and tariff item structures on economic sustainability.
The results of the research indicate that, although the new billing model slows down the return on investment compared to the previous period, photovoltaic systems remain profitable with proper sizing and optimization of self-consumption with the addition of batteries for storing excess electricity generated and a smart energy management system. The results also show that instead of maximum production, the focus should be on maximum self-consumption with smart energy management. The paper provides concrete guidelines for investors to make optimal decisions in the new regulatory environment.

Key words: photovoltaic systems, net-billing, battery systems, investment profitability

1. Uvod

Posljednjih desetljeća elektroenergetski sustavi prolaze kroz intenzivnu transformaciju potaknutu dekarbonizacijom, razvojem distribuiranih obnovljivih izvora energije i aktivnijim sudjelovanjem krajnjih kupaca na tržištu električne energije. Posebno važnu ulogu imaju fotonaponski (FN) sustavi instalirani na obiteljskim kućama, koji omogućuju proizvodnju električne energije za vlastite potrebe te smanjenje emisija stakleničkih plinova i troškova električne energije. Razvoj ovakvih sustava u velikoj je mjeri ovisan o regulatornom okviru. Većina europskih država posljednjih godina postupno napušta model neto mjerenja i prelazi na tržišno utemeljeni model neto obračuna, u kojem se električna energija preuzeta iz mreže i energija predana u mrežu obračunavaju odvojeno. Takav pristup proizlazi iz europske regulative, ponajprije Direktive (EU) 2019/944, Uredbe (EU) 2019/943 te Direktive (EU) 2018/2001 (RED II), kojima se potiče tržišno vrednovanje proizvedene električne energije i povećanje vlastite potrošnje proizvođača-potrošača.
Republika Hrvatska od 1. siječnja 2026. godine uvodi model neto obračuna za nove kupce s vlastitom proizvodnjom električne energije. Ova promjena značajno utječe na ekonomsku isplativost ulaganja u fotonaponske elektrane jer se višak proizvedene energije više ne vrednuje prema načelu netiranja količine energije, nego prema tržišnoj vrijednosti električne energije. Posljedica toga je povećana važnost optimiranja vlastite potrošnje, primjene baterijskih sustava za pohranu energije te prilagodbe profila potrošnje korisnika.
Cilj ovoga rada je analizirati ekonomsku isplativost fotonaponske elektrane za obiteljsku kuću u Hrvatskoj u novom modelu neto obračuna te istražiti utjecaj baterijskih sustava, razine samopotrošnje i tarifnog modela na razdoblje povrata investicije i ukupnu ekonomsku opravdanost ulaganja.

2. Regulatorni okvir prelaska na neto obračun

Europska unija kroz Direktivu (EU) 2019/944 o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije i Uredbu (EU) 2019/943 potiče razvoj konkurentnog i tržišno orijentiranog elektroenergetskog sustava. Poseban naglasak stavljen je na aktivne kupce koji imaju pravo proizvoditi, skladištiti i prodavati električnu energiju, pri čemu se vrijednost proizvedene energije određuje prema tržišnim načelima. Time se postupno napušta koncept neto mjerenja, u kojem su se preuzeta i predana električna energija obračunavale prvenstveno količinski, te se uvode modeli obračuna koji bolje odražavaju stvarnu tržišnu vrijednost električne energije [1], [2].

Sukladno europskom zakonodavnom okviru, Republika Hrvatska izmjenama Zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji usklađuje nacionalno zakonodavstvo s pravilima unutarnjeg tržišta električne energije. Izmjenama koje se primjenjuju od 1. siječnja 2026. godine uvodi se model neto obračuna za nove kupce s vlastitom proizvodnjom električne energije. U tom modelu električna energija preuzeta iz mreže obračunava se prema važećoj maloprodajnoj cijeni opskrbljivača, dok se višak električne energije predan u mrežu vrednuje prema tržišnoj referentnoj cijeni električne energije.

Za razliku od dosadašnjeg modela neto mjerenja, novi način obračuna značajno utječe na ekonomsku isplativost fotonaponskih sustava. Budući da je otkupna cijena električne energije predane u mrežu u pravilu niža od cijene električne energije preuzete iz mreže, povećava se važnost što većeg iskorištavanja proizvedene energije unutar vlastitog kućanstva. Time samopotrošnja postaje jedan od ključnih čimbenika pri projektiranju fotonaponskih elektrana.

Novi regulatorni okvir dodatno potiče primjenu baterijskih sustava za pohranu energije i sustava za pametno upravljanje potrošnjom. Takva rješenja omogućuju povećanje udjela vlastite potrošnje proizvedene električne energije, smanjenje količine energije predane u distribucijsku mrežu te poboljšanje ukupne ekonomske isplativosti ulaganja u fotonaponske sustave [3], [4].

U tablici 1. dana je usporedba osnovnih značajki, odnosno razlika modela neto mjerenja i neto obračuna.

Tablica 1. Usporedba osnovnih značajki modela net-metering i net-billing

Značajka	Neto mjerenje	Neto obračun
Način obračuna	Količina preuzete i predane energije	Financijsko vrednovanje energije
Vrijednost viška energije	Jednaka preuzetoj energiji	Tržišna referentna cijena
Ključni cilj korisnika	Maksimalna proizvodnja	Maksimalna samopotrošnja
Uloga baterijskog sustava	Manje izražena	Znatno važnija
Utjecaj na ROI	Kraći povrat investicije	Veća ovisnost o profilu potrošnje

3. Pregled dosadašnjih istraživanja

Pregled nekih dosadašnjih istraživanja na temu neto mjerenja i neto obračuna ukratko je prikazan u tablici 2.

Tablica 2. Kratki pregled dosadašnjih istraživanja

Autori	Godina	Područje istraživanja	Glavni zaključak
Fuster-Palop et al.	2023	Neto mjerenje i neto obarčun	Samopotrošnja postaje ključni čimbenik isplativosti [5].
Jasiński et al.	2024	Neto obračun	Novi model povećava važnost baterijskih sustava [6].
Ciocia et al.	2021	Samopotrošnja	Veća samopotrošnja smanjuje ovisnost o mreži [7].
Ovo istraživanje	2026	Hrvatska	Analiza isplativosti prema novom modelu neto obračun.

4. Metodologija istraživanja

Kao referentni objekt promatrana je obiteljska kuća u kontinentalnoj Hrvatskoj gdje je godišnja ozračenost 1582,50 kWh/m^2 godišnje, s godišnjom potrošnjom električne energije od približno 8 000 kWh. Analizirana je fotonaponska elektrana instalirane snage 7 kWp, pri čemu je procjena godišnje proizvodnje određena korištenjem meteoroloških podataka i alata PVGIS za klimatske uvjete Republike Hrvatske. Pretpostavljena je i raspodjela potrošnje električne energije na 68% za vrijeme više tarife (VT) i 32% za vrijeme niže tarife (NT).

Za FN elektranu korišteni su kvalitetni monosilicijski moduli postavljeni pod kutom 36˚, azimut 0˚, zemljopisna širina i dužina: 45.176,17.990.

Kako bi se ispitao utjecaj na razdoblje povrata investicije provedena je analiza kroz više scenarija:

- FN elektrana bez baterije za pohranu energije sa hibridnim izmjenjivačem
- instalacije kvalitetne LFP baterije 10 kWh (npr. Huawei LUNA ili Sofar GTX)
- instalacije manje kvalitetne baterija (Fuji/Ritar baterija) 10 kWh
- utjecaj samopotrošnje 30% i 35%
- utjecaj VT/NT
- vijek FN panela 25 godina, degradacija 0.5%/god

Pretpostavlja se iznos samopotrošnje bez baterije 30 % (za obiteljske kuće veća potrošnja je danju), a s baterijom samopotrošnja raste na 65% do 70% (zbog pohrane te se energija troši i u večernjim satima i noću).

U analizi su korištene pretpostavke koje odgovaraju regulatornom okviru koji se primjenjuje od 1. siječnja 2026. godine: električna energija preuzeta iz mreže obračunava se prema maloprodajnoj cijeni opskrbljivača, dok se višak proizvedene električne energije predan u distribucijsku mrežu vrednuje prema tržišnoj referentnoj cijeni električne energije sukladno modelu neto obračuna.

Za svaki scenarij izračunati su godišnja proizvodnja električne energije, količina energije preuzete iz mreže, količina energije predane u mrežu, godišnji troškovi električne energije, ostvarene uštede te razdoblje povrata investicije (ROI). Rezultati pojedinih scenarija međusobno su uspoređeni kako bi se odredio utjecaj pojedinih parametara na ekonomsku opravdanost ulaganja.

Pri procjeni isplativosti nisu uzimane u obzir moguće buduće promjene cijena električne energije, inflacija, promjene kamatnih stopa niti dodatni troškovi održavanja sustava, čime se omogućuje jednostavnija usporedba analiziranih scenarija.
Na slici 1. se vidi struktura cijene 1 kWh od 1.1.2026. za kućanstva sa svim davanjima (energija, mrežarina, naknada za OIE i PDV)
U Hrvatskoj postoji službeni pravni i regulatorni okvir, ali ne u obliku odluke o jedinstvenoj cijeni, već kroz kombinaciju Zakona i mjesečnih odluka o tržišnim cijenama.

1. **Zakonska osnova (Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o OIEIK)** - temelj za obračun u 2026. godini je Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (Narodne novine br. 78/2025).
2. **Mjesečne odluke HROTE-a o referentnim cijenama** - Hrvatski operator tržišta energije (HROTE) svakog mjeseca donosi i objavljuje tablice pod nazivom Referentna tržišna cijena za Sunčane elektrane (TCi sunce). Ta referentna vrijednost na tržištu u nekim mjesecima iznosi između 0,037 €/kWh i 0,042 €/kWh.

Opskrbljivači sami formiraju cjenike u skladu sa zakonskim minimumom od 90% neto cijene energije ili prateći HROTE - ove tržišne indekse. U praksi se otkup kreće oko 0,05 €/kWh [5]

Stavka	Viša tarifa	Niža tarifa
	EUR / kWh	EUR / kWh
Energija (opskrba)	0.097189	0.047688
Distribucija (+15% u 2026.)	0.044446	0.020514
Prijenos (+10% u 2026.)	0.0021256	0.008175
OIE + kogeneracija	0.013239	0.013239
Ostale naknade	0.003982	0.003982
Međuzbroj bez PDV-a	0.1609796	0.093598
PDV (13 %)	0.020927608	0.01216774
UKUPNO sa PDV	0.1819092	0.10576574
Opskrbna naknada	0.982 EUR/mjesečno	0.982 EUR/mjesečno
Naknada za mjernu uslugu	1.983 EUR/mjesečno	1.983 EUR/mjesečno
Naknade s PDV	3.35045	3.35045

Slika 1. Struktura cijene 1 kWh od 1.1.2026. za kućanstva sa svim davanjima

Za scenarij s baterijama uzeti su u obzir dostupni modeli baterija na hrvatskom tržištu: Huawei LUNA, Sofar BTS/GTX, Fuji/Ritar i druge popularne (Pylontech, BYD), a prikaz cijena (0% PDV) dat je na slici 2.

Proizvođač / Model	5 kWh (€)	5 kWh €/kWh	10 kWh (€)	10kWh €/kWh	Ciklusi	Jamstvo	Napomena
Huawei LUNA2000	2500-2800	500-560	5000-5800	500-580	6000-8000	10 god.	Premium, HV, IP66, modularna
Sofar BTS/GTX	1600-1800	320-360	3100-3500	310-350	6000+	10 god.	Visoka kvaliteta, CAN/RS485
Fuji / Ritar	700-850	140-170	1300-1700	130-170	5000-7000	5-8 god.	Najjeftinije, wallbox, dobar omjer
Pylontech (US3000)	1800-2200	360-440	3400-4200	340-420	6000+	10 god.	Popularna, rackmount
BYD Battery-Box	2000-2400	400-480	3800-4500	380-450	8000+	10 god.	Industrijska kvaliteta
Deye / GoodWe	1500-1900	300-380	2900-3500	290-350	5000+	8 god.	Kompatibilna s inverterima

Slika 2. Prikaz cijena €/kWh računato na nominalni kapacitet

5. Rezultati analize

Bez FN elektrane trošak struje s godišnjom potrošnjom električne energije od približno 8000 kWh (do 6000 kWh računa se bazna cijena, a na potrošene kWh iznad 6000 računa se cijena uvećana za 35%) s pretpostavkom odnosa VT 68%, a NT 32% iznosi 1374 EUR godišnje.

Ukupni trošak FN elektrane bez baterije procjenjuje se na 5500 EUR (bez PDV-a na opremu), na osnovu tržišnih cijena u Hrvatskoj 2026. (slika 3.)

Komponenta	Cijena (EUR)	Napomena
PV moduli 16 kom (85 EUR komad) TRINA 445W Half Cell Mono solarni paneli:TRINA VERTEX 445W Trina Vertex NEG9R.28 450W	1360	Monosilicijski, visoke kvalitete
Hibridni inverter (7 kW)	1500	Prosječna cijena za kvalitetan model
Montaža i kablovi / sklopke / ormarić	1500	Uključuje rad i materijale
Dokumentacija	400	Obvezna za net billing
Backup Box (opciono za hib.)	400	Za baterijske varijante
Dvotarifno brojilo / osiguranje početno	300	Zamjena i setup
Ukupno bez baterije	5460	Zaokruženo na 5500 EUR
Kvalitetna LFP baterija (Sofar/Huawei 10 kWh)	+3150	Ukupno 9050 EUR
Jeftinija baterija (Fuji/Ritar 10 kWh)	+1350	Ukupno 7250 EUR

Slika 3. Procjena ukupnog troška FN elektrane bez baterije

Korištenjem FN elektrane bez baterije značajan dio proizvedene električne energije tijekom dana završava u distribucijskoj mreži, pogotovo u ljetnim mjesecima kada je proizvodnja na puno višem nivou. Uvođenjem baterija povećava se udio vlastite potrošnje proizvedene električne energije i smanjuje količina energije predane u mrežu. Samim time se smanjuje količina električne energije koju je potrebno preuzeti iz mreže tijekom večernjih i noćnih sati, što pozitivno utječe na ekonomsku isplativost sustava.

Na slici 4. je dan prikaz raspodjele potrošnje u kWh u toku jedne godine za različite varijante (bez baterije te sa jeftinijom i skupljom baterijom): količina proizvedene energije, količina potrošene energije kroz samopotrošnju, potrošnja iz mreže i energija predana u mrežu.

Mjesec	FN proizvodnja (kWh)	Samopotrošnja (kWh)			Potrošnja kuće (kWh)	Potrošnja iz mreže (kWh)			U mrežu iz FN (kWh)		
		bez bat. (30%)	kval. Bat. (70%)	jeft. Bat. (65%)		(bez bat.)	(kval. Bat.)	(jeft. Bat.)	(bez bat.)	(kval. Bat.)	(jeft. Bat.)
Sij	420.7	126.2	294.5	273.5	650	523.8	355.5	376.5	294.5	126.2	147.2
Velj	491.3	147.4	343.9	319.3	650	502.6	306.1	330.7	343.9	147.4	172
Ožu	764.7	229.4	535.3	496.6	650	420.6	114.7	153.4	535.3	229.4	268.1
Tra	875.2	262.6	612.6	569	533	270.4	0	0	612.6	262.6	306.2
Svi	951.9	285.6	666.3	618.7	533	247.4	0	0	666.3	285.6	333.2
Lip	996.1	298.8	697.3	647.5	650	351.2	0	2.5	697.3	298.8	348.6
Srp	1070.7	321.2	749.5	695.9	867	545.8	117.5	171.1	749.5	321.2	374.8
Kol	1037.2	311.2	726	674.2	867	555.8	141	192.8	726	311.2	363
Ruj	836.8	251.0	585.8	543.9	533	282	0	0	585.8	251	292.9
Lis	705.3	211.6	493.7	458.4	650	438.4	156.3	191.6	493.7	211.6	246.9
Stu	435.9	130.8	305.1	283.3	650	519.2	344.9	366.7	305.1	130.8	152.6
Pro	348.5	104.6	244	226.5	733	628.4	489	506.5	243.9	104.5	122
God	**8934**	**2680**	**6254**	**5807**	**8000**	**5320**	**1746**	**2193**	**6254**	**2680**	**3127**

Slika 4. Raspodjela energije po mjesecima u toku godine

Prikaz troškova i uštede dan je u tablici 3.

Tablica 3. Tablica godišnjih ušteda

Scenarij	Samopotrošnja kWh	Neto mreža kWh	VT (EUR)	NT (EUR)	Trošak mreža	**+3.35 EUR**	Prodaja (EUR)	**Neto trošak**	**Ušteda (EUR)**
Bez FN	0	8000	1074	299	1371.00	**1374.35**	0	**1374.35**	-
Bez bat. (30%)	2680	**5320**	**658**	**180**	**838.14**	**841.49**	**312.70**	**528.79**	**845.56**
Kval. bat. (70%)	6254	1746	215	107	322	**325.35**	134	**191.35**	**1183.00**
Jeft. bat. (65%)	5807	2193	269	134	403	**406.35**	156	**250.35**	**1124.00**

Kumulativni prikaz povrata investicije dan je na slici 5. gdje su crveno označene godine povrata investicije te nakon 25 godina prikazane vrijednosti uštede za različite varijante. Iz prikazanih rezultata je vidljivo da je varijanta s jeftinijom baterijom najisplativija i donosi najveću uštedu od 17.471 EUR, a već u 7. godini počinje ostvarivati dobit od 618 EUR.

Godina	Bez baterije	Kval. baterija	Jeft. baterija
G0	**-5500**	**-9050**	**-7250**
G1	-4654	-7867	-6126
G2	-3811	-6684	-5002
G3	-2970	-5501	-3878
G4	-2130	-4318	-2754
G5	-1291	-3135	-1630
G6	-453	-1952	-506
G7	**383**	-769	**618**
G8	1217	**414**	1742
G9	2048	1597	2866
G10	2876	2780	3990
G11	3701	3963	**5130 → 4320**
G12	**3701-1500=2201**	**3963-1500=2463**	**4320-1500=2820**
G13	3026	**2463-1890=573**	3947

Godina	Bez baterije	Kval. baterija	Jeft. baterija
G14	3850	1756	5074
G15	4671	2939	6201
G16	5490	4122	7328
G17	6307	5305	8455
G18	7122	6488	9582
G19	7935	7671	10709
G20	8746	8854	11836
G21	9555	10037	12963
G22	10362	11220	14090
G23	11168	12403	15217
G24	11972	13586	16344
G25	**12775**	**14769**	**17471**

Slika 5. Prikaz povrata investicije i uštede nakon 25 godina

Analiza različitih tarifnih modela pokazuje da struktura potrošnje između više (VT) i niže tarife (NT) također utječe na ukupnu ekonomsku isplativost ulaganja. Veća potrošnja tijekom razdoblja proizvodnje fotonaponske elektrane dodatno povećava financijske koristi sustava.

Na slici 6. je dan prikaz povrata investicije kroz 25 godina za slučaj kada je raspodjela tarifa na način VT 55% / NT 45% i uz inflaciju 3% za tri promatrana modela: rad sustava bez baterije, s kvalitetnijom baterijom te s jeftinijom baterijom.

Godina	Bez baterije	Kvalitetna bat. (70%)	Jeftinija bat. (65%)
G0	**-5500**	**-9050**	**-7250**
G1	-4772	-7989	-6243
G2	-3937	-6799	-5071
G3	-3104	-5609	-3899
G4	-2273	-4419	-2727
G5	-1444	-3229	-1555
G6	-618	-2039	-383
G7	**205**	-849	**790**
G8	1040	**332**	1971
G9	1891	1526	3168
G10	2760	2733	4381
G11	3648	3954	**4381-810=3571**
G12	**3648-1500=2148**	**3954-1500=2454**	**3571-1500=2071**
G13	2931	**2454-1890=564**	3246

Godina	Bez baterije	Kvalitetna ba. (70%)	Jeftinija bat. (65%)
G14	3728	1556	4435
G15	4544	2662	5638
G16	5381	3782	6856
G17	6239	4917	8089
G18	7119	6068	9338
G19	8023	7235	10604
G20	8952	8419	11887
G21	9906	9619	13188
G22	10886	10836	14508
G23	11893	12071	15847
G24	12929	13326	17206
G25	**13996**	**14602**	**18595**

Slika 6. model povrata investicije za VT 55% / NT 45% i uz inflaciju 3%

Iz priloženog prikaza jasno je vidljivo kada pojedini model počinje ostvarivati dobit. Model s jeftinijom baterijom već u 7. godini (G7) ostvaruje dobit s iznosom od 790 EUR, dok kod varijante s kvalitetnijom baterijom dobit se ostvaruje tek godinu kasnije (G8 sa 332 EUR). Nakon 25 godina (G25), model s jeftinijom baterijom ostvaruje veću ukupnu dobit (18.595

EUR) u odnosu na kvalitetniju bateriju (14.602 EUR) i rad bez baterije (13.996 EUR), a što je prikazano i na slici 7.

Scenarij	55/45% G25	68/32% G25	Razlika
Bez baterije	**+13.996€**	+19.055€	**-26%**
Kval. baterija	**+14.602€**	+16.701€	**-13%**
Jeft. baterija	**+18.595€**	+21.613€	**-14%**

Scenarij	Payback	G12 (zamjene)	Kum. CF G25
Bez baterije	**7 godina**	↓2148 EUR	**+13.996 EUR**
Kval. baterija	**8 godina**	↓2454 EUR	**+14.602 EUR**
Jeft. baterija	**7 godina**	↓2071 EUR	**+18.595 EUR**

Slika 7. Usporedba dobiti s različitim udjelom tarifa

Model isplativosti s povećanjem postotka samopotrošnje na 35 % i raspodjelom tarife VT 68%/ NT 32% uz inflaciju 3% dan je na slici 8. odnosno slici 9. Na slici 8. prikazani su mjesečni rezultati FN proizvodnje i potrošnje kućanstva te utjecaj korištenja baterija na postotak samopotrošnje i razmjenu energije s mrežom kroz cijelu godinu. Iz podataka je vidljivo da sustav bez baterije ima velike oscilacije u samopotrošnji u zimskim mjesecima (kreće se oko 26% do 30%) zbog smanjenog broja sunčanih sati te je potreban značajan uvoz električne energije iz mreže (primjerice 543 kWh u prosincu). S druge strane, uvođenjem baterije, postotak samopotrošnje se stabilizira na visokih 65% do 77% tijekom cijele godine, čime se drastično smanjuje potreba za povlačenjem energije iz mreže. Slično je i u ljetnim mjesecima jer se pretpostavlja korištenje klima uređaja u večernjim i noćnim satima te je bez korištenja baterija potrebno povući veći dio energije iz mreže.

Mjesec	FN proizvodnja	Potrošnja kuće	Bez baterije			Jeftinija baterija			Kvalitetna baterija		
			Samopotr %	Iz mreže kWh	U mrežu kWh	Samopotr. %	Iz mreže kWh	U mrežu kWh	Samopotr. %	Iz mreže kWh	u mrežu kWh
Sij	420.7	650	**29%**	**462**	**0**	65%	228	0	70%	195	0
Vel	491.3	650	**30%**	**455**	**0**	65%	228	0	70%	195	0
Ožu	764.7	650	**37%**	**410**	**115**	65%	228	0	70%	195	0
Tra	875.2	533	**47%**	**283**	**202**	65%	186	15	70%	160	0
Svi	951.9	533	**62%**	**203**	**419**	70%	160	259	70%	160	259
Lip	996.1	650	**54%**	**298**	**346**	77%	149	197	77%	149	197
Srp	1070.7	867	**36%**	**555**	**204**	65%	303	0	70%	260	0
Kol	1037.2	867	**36%**	**555**	**170**	65%	303	0	70%	260	0
Ruj	836.8	533	**62%**	**203**	**304**	70%	160	144	70%	160	144
Lis	705.3	650	**35%**	**423**	**55**	65%	228	0	70%	195	0
Stu	435.9	650	**28%**	**469**	**0**	65%	228	0	70%	195	0
Pro	348.5	733	**26%**	**543**	**0**	65%	256	0	70%	220	0

Slika 8. Potrošnja po mjesecima uz samopotrošnju 35% te raspodjelom VT 68%/ NT 32%

Na slici 9. prikazan je povrat investicije i kretanje dobiti kroz 25 godina za model s povećanom samopotrošnjom na 35% i tarifnim omjerom VT 68% / NT 32%. Rezultati pokazuju da opcija s jeftinijom baterijom izlazi iz minusa već u 6. godini (G6), a nakon 25

godina (G25), model s jeftinijom baterijom ostvaruje najveću ukupnu dobit od 19.805 EUR za razliku od modela s kvalitetnijom baterijom (16.155 EUR) ili modela bez baterije (15.945 EUR).

Godina	Bez baterije	Jeft. baterija	Kval. baterija
G0	**-5500**	**-7250**	**-9050**
G1	-4606	-6126	-7867
G2	-3720	-4873	-6565
G3	-2837	-3619	-5256
G4	-1957	-2368	-3945
G5	-1080	-1119	-2629
G6	-205	**131**	-1309
G7	**668**	**1381**	**14**
G8	1547	2641	1340
G9	2434	3913	2681
G10	3330	5199	4033
G11	4236	**5199-810=4389**	5399
G12	**4236-1500=2736**	**4389-1500=2889**	**5399-1500=3899**
G13	3637	4071	**3899-1890=2009**

Godina	Bez baterije	Jeft. baterija	Kval. baterija
G14	4554	5269	3082
G15	5482	6482	4170
G16	6423	7712	5274
G17	7380	8958	6395
G18	8354	10222	7535
G19	9346	11505	8695
G20	10367	12808	9876
G21	11419	14133	11079
G22	12499	15500	12305
G23	13612	16900	13555
G24	14760	18334	14831
G25	**15945**	**19805**	**16155**

Slika 9. Kumulativni prikaz povrata investicije i dobiti uz samopotrošnju 35% te raspodjelom VT 68%/ NT 32%

6. Zaključak

Prijelaz Republike Hrvatske na model neto obračuna od 1. siječnja 2026. godine predstavlja jednu od najznačajnijih regulatornih promjena za kupce s vlastitom proizvodnjom električne energije. Novi model obračuna mijenja način vrednovanja električne energije predane u distribucijsku mrežu te zahtijeva drugačiji pristup projektiranju i korištenju kućnih fotonaponskih elektrana.

Provedena analiza pokazuje da fotonaponski sustavi i u novom regulatornom okviru ostaju ekonomski opravdana investicija, ali njihova isplativost u znatno većoj mjeri ovisi o razini vlastite potrošnje proizvedene električne energije. U svim analiziranim modelima, korištenje jeftinije baterije pokazalo se kao najisplativije rješenje, a pokazatelj je ostvarena maksimalna dobit nakon 25 godina rada u oba promatrana slučaja (uz različite tarife. Može se zaključiti da ključan faktor za optimizaciju ulaganja u fotonaponski sustav nije složenost tarifne strukture, već smanjenje početnih troškova opreme (jeftinija baterija).

Primarni cilj je optimiranje proizvodnje i potrošnje električne energije unutar kućanstva kako bi se smanjila potreba za preuzimanjem energije iz mreže i povećala iskorištenost vlastito proizvedene energije.

Rezultati ovog rada mogu biti korisni vlasnicima obiteljskih kuća, projektantima fotonaponskih sustava, energetskim savjetnicima i donositeljima odluka pri planiranju ulaganja u obnovljive izvore energije u uvjetima primjene modela neto obračuna. Također predstavljaju osnovu za daljnja istraživanja koja će uključiti utjecaj promjenjivih tržišnih cijena električne energije, razvoja baterijskih tehnologija i primjene naprednih sustava upravljanja energijom u kućanstvima.

7. Literatura

[1] Direktiva (EU) 2019/944 europskog parlamenta i vijeća https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944

[2] Uredba (EU) 2019/943 europskog parlamenta i vijeća https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0943

[3] Zakon o izmjenama i dopunama zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2025_05_78_1017.html

[4] Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_09_100_1937.html

[5] HROTE – Hrvatski operator tržišta energije d.o.o. https://www.hrote.hr/podaci-za-obracun

[6] Enrique Fuster-Palop; Carlos Prades-Gil; Ximo Masip; J. D. Viana-Fons; Jorge Payá. Techno-Economic Potential of Urban Photovoltaics: Comparison of Net Billing and Net Metering in a Mediterranean Municipality. Energies 2023, 16, 3564. https://doi.org/10.3390/en16083564

[7] Jakub Jasi´nski; Mariusz Kozakiewicz; Maciej Sołtysik. Analysis of the Economic Soundness and Viability of Migrating from Net Billing to Net Metering Using Energy Cooperatives. Energies 2024, 17, 1330. https://doi.org/10.3390/en17061330

[8] Alessandro Ciocia; Angela Amato; Paolo Di Leo; Stefania Fichera; Gabriele Malgaroli; Filippo Spertino; Slavka Tzanova. Self-Consumption and Self-Sufficiency in Photovoltaic Systems: Effect of Grid Limitation and Storage Installation. Energies 2021, 14, 1591. https://doi.org/10.3390/en14061591

Funding: This research paper was funded by the University of Slavonski Brod through the institutional research project “Zelena Tranzicija (ZeTra)”, financed by the European Union — NextGenerationEU.

Prilozi za povijest energetike Slavonije i Baranje (3)

Doprinosi Vladimira Tomića razvoju poduzeća „Elektroslavonija“ (Osijek) i plinofikaciji slavonske regije

Contributions of Vladimir Tomić in Process of Development of the Company "Elektroslavonija" (Osijek) and the Gasification of the Slavonia Region

M. Ivanović*

PANON - institut za strateške studije, Osijek, Hrvatska

*Autor za korespodenciju. E-mail: panon.institut@gmail.com

Sažetak

U seriji radova 'Prilozi za povijest energetike Slavonije i Baranje' na ovom simpoziju obrađuju se početci i razvoj energetskih kapaciteta na području regije Slavonije i Baranje. U ovom se radu obrađuju procesi prerastanja „Elektroslavonije“ u veliku i značajnu energetsku tvrtku u Hrvatskoj kroz (a) izgradnju proizvodnih elektroenergetskih kapaciteta,(b) procese plinofikacije slavonske regije te (c) toplifikacije grada Osijeka. U svim tim procesima vrlo su važni doprinosi generalnog direktora Vladimira Tomića – glavnog direktora poduzeća „Elektroslavonija“ Osijek. U zaključku se ukazuje na značaj provedenog procesa plinofikacije regije.

Ključne riječi: Elektroslavonija, Plinofikacija, Povijest slavonske energetike, Regija Slavonija, Toplifikacija Osijeka, Vladimir Tomić

Abstract

In the series of papers 'Contributions to the history of energy in Slavonia and Baranja', this symposium deals with the beginnings and development of energy capacities in the region of Slavonia and Baranja. This paper deals with the processes of "Elektroslavonija" growing into a large and significant energy company in Croatia through (a) the construction of production electricity capacities, (b) the processes of gasification of the Slavonian region and (c) the district heating of the city of Osijek. In all these processes, the contributions of the general director Vladimir Tomić - the general director of the company "Elektroslavonija" Osijek, are very important. The conclusion points out the significance of the implemented process of gasification of the region.

Keywords: District heating of Osijek, "Elektroslavonija", Gasification, History of Slavonian energy, Slavonia region, Vladimir Tomić

1. Osnivanje i razvoj poduzeća „Elektroslavonija“ Osijek

Elektroprivredno poduzeće “Elektroslavonija” iz Osijeka se razvilo iz nekadašnjeg Gradskog poduzeća "Osječka Munjara i Tramvaj" koje je osnovano u Osijeku 1926. godine kao posebna ustanova Gradske općine. Na području Slavonko-baranjske regije početkom 1941. g. u pogonu je 21. elektroenergetski proizvodni objekt - male lokalne i industrijske elektrane (dizel agregati, termo-elektrane na ugljen i jedna mala hidroelektrana) - koji su napajali svoje industrijske pogone i nekolicinu naselja. Sva ostala naselja bila su bez električne energije. Tijekom II. svjetskog rata u bombardiranju savezničkih snaga u gradu Osijeku (1944.) pogođena je i termoelektrana, a stradale su (od strane okupatora prilikom njihovog povlačenja) i elektrane u Vukovaru, Slavonskom Brodu i Slavonskoj Požegi. Isto tako stradale su i mjesne distribucijske mreže. Po oslobođenju poduzeće "Munjara i Tramvaj" se udružuje s poduzećem „Vodovod i Plinara“ - no, ubrzo, potkraj 1945. godine iz poslovanja poduzeća izdvojen je tramvajski prijevoz (u novu komunalnu tvrtku). Od 1.1.1946. godine poduzeće postaje podružnica novo-osnovanog nacionalnog poduzeća ELPOH Zagreb (Električno poduzeće Hrvatske). Godinu dana kasnije osječko poduzeće se osamostaljuje te od 1. siječnja 1947. godine posluje pod imenom "Elektroslavonija" - **e**lektroprivredno poduzeće Osijek. Novo poduzeće ima 11 područnih ureda: Donji Miholjac, Đakovo, Našice, Nova Gradiška, Podravska Slatina, Slavonska Požega, Slavonski Brod, Valpovo, Vinkovci i Vukovar, a prve godine rada obuhvaćale su isključivo obnovu elektroenergetskih vodova i pogona te elektrifikaciju naselja, [1].

1.1. Elektrifikacija

Na području slavonske regije mnoga proizvodna i distributivna postrojenja stradala su tijekom rata te su morala biti obnavljana; potrošnja električne energije dosegnula je predratnu razinu tek 1948. godine (543 GWh). Godine 1945. na području Hrvatske samo je 13% elektrificiranih naselja, odnosno 20 % elektrificiranih kućanstava. Na području Slavonije stanje je bilo još nepovoljnije. Poteškoće u elektrifikacije proizlazile su zbog ograničenih financijskih sredstava, nedostatka tehničke opreme i alata te nedovoljnog stručnog kadra. No, potpuna elektrifikacija je uspješno završena 1986. godine (tab. 1.).

Tablica 1. Elektrificiranost naselja i kućanstava na području Slavonije i Baranje

Godina	Postotak naselja	Postotak kućanstava
1948.	6	(nema podatka)
1953.	10	(nema podatka)
1965.	70	(nema podatka)
1971.	93	(nema podatka)
1986.	100	100

Izvor: [1] [2]

1.2. Pogon pomoćnih djelatnosti

Pomoćne djelatnosti u „Elektroslavoniji“ – elektromontažna, strojo-bravarska i stolarska radionica, tokarija, skladište, auto-mehanička radionica, baždarnica brojila i druge pomoćne djelatnosti - bile su smještene u dvorištu stare elektrane u Osijeku, a trafo-radionica uz TS 110/35 kV Osijek 1 (na Brijestu). Ovi su radni prostori bili ne uvjetni i te su službe u skučenim prostorima funkcionirale uz značajne poteškoće. Zaslugom tadašnjeg direktora Vladimira Žanića pokrenuta je 1970. gradnja Pogona pomoćnih djelatnosti. U Pogonu su smješteni: auto-mehanička radionica s natkrivenom i otvorenom garažom, baždarnica brojila, strojobravarska, bravarska i stolarska radionica, elektromontaža, lakirnica, veliko natkriveno i otkriveno središnje skladište poduzeća, trafo-radionica, radionica za popravak visoko-naponskih aparata i visoko-naponska ispitna stanica (s originalnim rješenjem vađenja transformatora). Pogon je imao i željeznički priključak za dovoz krupne opreme i materijala. U krugu Pogona, izveden je restoran za zaposlene, ambulanta, knjižnica, dvorana za velike skupove, te rekreacijski centar s kuglanom, prostorom za stolni tenis i otvorenim bazenom, te igralištima za rukomet/mali nogomet, košarku, odbojku i tenis, [3].

Godine 1977. na rubu parcele Pogona pomoćnih djelatnosti izgrađena je zgrada Računsko-dispečerskog centra s prostorom za Elektronički računski centar, Centar daljinskog upravljanja prijenosnom mrežom, Distribucijski dispečerski centar Osijek, te Projektni odjel i središnju arhivu poduzeća. U tom objektu, od tada, smještena je i glavnina rukovodnog i pogonskog osoblja Prijenosnog područja Osijek.

1.3. Prijenos električne energije

Vladimir Žanić, kao direktor „Elektroslavonije“, zaslužan je i „*za donošenje tzv. saborskog programa razvoja prijenosne mreže u Slavoniji i Baranji, koji je konačno usvojen 1969. godine, a po kojem je financiranju izgradnje prijenosne mreže u slavonskoj regiji dodijeljen prioritet jednak prioritetu financiranja izgradnje elektrana na drugim područjima Hrvatske; to s obzirom da je prijenosna mreža u Slavoniji i Baranji imala ulogu „izvora“ električne energije, jer izvora primarne energije na našem području nije bilo“,* [4].

Tako je prema koncepciji razvoja „Elektroslavonije“, početkom siječnja 1971. godine utemeljena Radna jedinica elektroprijenosne djelatnosti (prijenos na visokom naponu) sa sjedištem u Osijeku – koja je kasnije prerasta u OOUR (poduzeće) u sastavu „Elektro-slavonije“). Tako je „Elektroslavonija“ Osijek postala četvrto elektroprivredno poduzeće u Hrvatskoj, jer – do tada je poduzeće obavljalo samo distribuciju električne energije.

Zaslugom direktora Žanića i njegovih suradnika usvojena je (1970.): strateška odluka o lociranju i gradnji transformatorske stanice (TS) 400/110 kV Ernestinovo. To je jedan od najvažnijih elektroenergetskih objekata u Republici Hrvatskoj i ključno čvorište prijenosne mreže koje povezuje istok države s ostatkom elektroenergetskog sustava te susjednim zemljama. TS je građena narednih godina i puštena u rad 1977. godine. zajedno s prvim 400 kV dalekovodom. Tako je osigurana transformacija električne energije s primarnog napona 400 kV na 110 kV i 35 kV. To je omogućilo pouzdanu i sigurnu opskrbu električnom energijom za cijelu istočnu Slavoniju i Baranju. U isto vrijeme TS Ernestinovo služi kao ključna inter-konekcijska točka za prijenos energije prema Mađarskoj, Srbiji i Bosni i Hercegovini, čime povezuje elektroenergetske mreže jugoistočne i srednje Europe. Kasnijih

godina (1972.-1990.) na području Slavonije i Baranje razvijan je sustav prijenosa električne energije na visokom naponu. [4]

1.4. Plinofikacija

Nakon otkrića plinskog polja Bokšić Lug, 1973. godine u INA-„Naftaplinu“ je - na te-melju ankete industrijskih potrošača - izrađena studija "Problematika plinofikacije i istraži-vanje tržišta prirodnog plina na području slavonsko-baranjske makroregije" (I. i II. dio). Ova je studija pokazala da je najveća potrošnja supstitutabilne energije u gradovima, sjedištima tadašnjih općina, a među njima posebice Osijek i Valpovo s Belišćem, što je i odredilo smjerove gradnje prvih dionica magistralnih plinovoda. INA-„Naftaplin“ je studiju dostavila Privrednoj komori Slavonije i Baranje u Osijeku na razmatranje i provedbu. No, zbog nedovoljne pripremljenosti potencijalnih potrošača na području regije za prihvat plina ovaj se projekt u Slavoniji nije mogao brzo realizirati. Stoga je eksploatacija prirodnog plina iz Slavonije usmjerena k spremnim potrošačima na području ranije plinoficiranog dijela SR Hrvatske - okolica Zagreba. [5] [6] [7] Ovdje valja ukazati na činjenicu da se nabava mazuta i ugljena (za energetske potrebe industrije) plaćala franko rudnik ili rafinerija te su troškovi dobave ovih energenata (znatno skupljih od plina) iznosili gotovo koliko i godišnja akumulacija industrije u regiji, [8].

Ni godinu dana nakon otkrića plinskog polja Bokšić Lug - 1974. godine - u proces plinofikacije regije uključila se "Elektroslavonija" Osijek i to:

a) izgradnjom plinsko-turbinske elektrane (PTE) u Osijeku (kao velikog potrošača slobodnih količina plina) i
b) vođenjem poslova plinifikacije na regionalnoj razini.

Naime, na poticaj Savjeta za energetiku Privredne komore Slavonije i Baranje u Osijeku, Radnički savjet "Elektroslavonije" donio je - na sjednici 25. srpnja 1974. godine -odluku da se "Elektroslavonija" prihvati poslova organizatora i nositelja plinofikacije Slavonije i Baranje "*kao najprikladnija radna organizacija za obavljanje te djelatnosti*." "Elektroslavonija" je već 3. kolovoza 1974. godine uputila u 14 općina u sastavu Zajednice općina Osijek (ZOO) ponudu za nositelja plinofikacije. Tu je ponudu prihvatilo 1974. godine šest općina, 1975. godine četiri općine i 1976. godine još dvije općine, dok se općine Vinkovci i Brod nisu očitovale. Sretna je okolnost bila da su se u ovaj proces, ponekad i uz dodatna stručna objašnjenja i uvjeravanja, uključile sve općine u podravskom dijelu Slavonije, tako da su se pripremni radovi mogli nesmetano i pravodobno obavljati. U "Elektroslavoniji" su odmah prišli izradi studija plinofikacije za općine na čijem su području 1975. godine gradili magistralni plinovodi. Studije su omogućile izradu Programa plinofikacija za tekuće srednjoročno razdoblje za svaku općinu pojedinačno, te izbor najpovoljnijih dionica, koje je bilo ekonomski opravdano graditi. Za takve dionice žurno se radila i projektna dokumentacija, [5].

Po imenovanju za nositelja poslova plinofikacije na području Slavonije i Baranje - u ljeto 1975. godine pri Odjelu za razvoj Termo-elektrana-Toplana Osijek (tadašnji OOUR ˝Elektroslavonije˝) na poslovima plinofikacije zaposlena su tri diplomirana inženjera strojarstva. Krajem godine bilo je 7 zaposlenika, u 1976. broj zaposlenih bio je 17, a kako se, kasnije, povećavao obujam poslova – povećavao se broj zaposlenika te prilagođavala

organizacijska struktura i ekonomsko-pravni status. Prirodni plin doveden je u Osijek koncem 1975. godine do lokacije PTE na Zelenom polju.
Tijekom godina – izgradnjom distributivnih plinovoda – povećavao se broj potrošača plina (industrija, komunalne djelatnosti i javne službe te kućanstva i rasla je potrošnja prirodnog plina (tab. 1);

Tablica 1. Potrošnja prirodnog plina u Slavoniji u distribuciji „Elektroslavonije“ 1976.-1991. (10^3 m^3)

Rb	Općina	1976.	1977.	1978.	1979.	1981.	1983.	1985.	1987.	1989.	1991.
1.	Osijek	17.236	20.114	40.624	77.874	55.062	60.104	48.765	63.463	81.588	83.927
2.	Našice	-	-	185	2189	5034	5270	5977	6121	6078	7704
3.	Valpovo	-	-	-	-	-	-	47	50	744	2716
4.	D. Miholjac	-	853	1692	2049	3582	4092	6348	5952	5609	6710
5.	Pod. Slatina	-	-	-	-	1137	3638	4613	5349	6697	8641
6.	Slav. Požega	-	-	-	-	54	5301	9013	13083	14238	14947
„Elektroslavonija“		**17.236**	**20.967**	**42.501**	**82.112**	**64.869**	**78.405**	**74.763**	**94.018**	**114.954**	**124.645**
a	PTE	17.236	17.243	31.793	55.854	25.240	21.281	10.458	11.399	30.213	33.106
b	Ind.kom. potr.	-	3.537	9.982	24.796	44.227	59.811	64.837	93.997	91.507	84.915
c	Kućanstva	-	187	726	1.462	4.254	7.630	10.840	11.972	19.883	29.181
7.	Sl. Brod	-	-	-	-	-	-	-	12.906	14.132	11.530
8.	Vinkovci	-	-	-	-	-	-	-	-	-	424
9.	Orahovica	-	-	-	-	8.852	10.317	11.372	10.444	12.517	10.603
Ukupno REGIJA		**17.236**	**20.967**	**42.501**	**82.112**	**73.721**	**88.722**	**86.135**	**117.368**	**141.603**	**147.202**

Izvor: [8]

1.5. Toplifikacija grada Osijeka

Gradska termoelektrana snage 2 MW (izgrađena 1926. g.) sredinom 1960-tih je (u sustavu elektroprivrede) bila sve manje tehnički pouzdan i ekonomski rentabilan proizvodni objekt. Termoelektrana Osijek je 1963. godine preorijentirana na proizvodnju topline; od tada i postoji Toplana u Osijeku te započinje toplifikacija grada Osijeka. Osijek je bio prvi grad u Jugoslaviji u kojem je izvršena podjela grada na zonu plinofikacije i zonu toplifikacije; toplinska mreža se gradila u naseljima višekatnih zgrada, jer je centralizirano grijanje (putem toplane) nerentabilno za obiteljske kuće, [8].

Ključne etape razvoja

- 1960. godina: Izgrađen je 65 metara visoki dimnjak stare elektrane Osijek;
- 1963. godine prenamjena dotadašnje termoelektrane u gradsku toplanu;
- 1975.–1976. godina: „Elektroslavonija“ Osijek gradi plinsko-turbinsku elektranu (PTE Osijek). INA-Naftaplin istovremeno dovršava transportni plinovod iz crpilišta Beničanci i Bokšić Lug radi osiguranja prirodnog plina kao primarnog energenta;
- 1976. Puštena u pogon PTE snage 2 x 25 MW na Zelenom polju;
- 1985. godina: na lokaciji TE-TO Osijek u pogon je pušten kogeneracijski Blok A TE-TO Osijek s električnom snagom 45 MW i toplinskom snagom od 130 MW. Time sustav prelazi na visoko učinkovitu kombiniranu proizvodnju električne energije s proizvodnjom vrele vode i tehnološke pare u spojnom procesu;
- 1987. godina: Izgrađen je i položen prvi magistralni spojni vrelovod duljine 4,4 km, promjera 550 mm kojim su spojeni TE-TO Osijek i centralna toplana Pogona Osijek radi distribucije toplinske energije do krajnjih kupaca, [8].

1.6. Proizvodnja električne i toplinske energije

Tijekom razdoblja od 1972. do 1990. godine u Osijeku je u okviru „Elektroslavonije“ izgrađeno više objekata za proizvodnju električne energije – čime je ova regija dobila značajne rezerve za funkcioniranje u izvanrednim uvjetima. Tako su izgrađene slijedeće elektrane:

- 1976. Puštena u pogon PTE snage 2 x 25 MW - na Zelenom polju.- koja kao gorivo može koristiti prirodni plin i ekstra lako loživo ulje.
- Blokovi C, D i E sustav su tri parna kotla (steamblock - SBK), puštenih u pogon 1976. godine. Svaki od tri kotla može proizvesti po 18 t/h pare temperature 250 °C i tlaka 12,5 bara, a kao gorivo se koristi prirodni plin ili plinsko ulje. Para iz SBK kotlova služi kao tehnološka para, ali i za proizvodnju ogrjevne topline.
- Blok A, kogeneracijski blok električne snage 45 MW_{el} i toplinske snage 130 MW_{topl}, pušten je u pogon 1985. godine, [9].

Slika 1. Osijek, Zeleno polje – kompleks proizvodnih energetskih objekata „Elektroslavonije“ Osijek [9]

2. Vladimir Tomić – životopis

Vladimir Tomić je rođen 1935. godine Osijeku u staroj osječkoj obitelji. Nakon završene osnovne i srednje tehničke škole u Osijeku, 1953.g zapošljava se u "Elektroslavoniji" kao elektrotehničar te napreduje - od voditelja alatnice do poslovođe na gradilištima. Od 1955. do 1960. g. studira i diplomira na Elektrotehničkom fakultetu Zagreb - uz stipendiju "Elektroslavonije" - nakon čega se vraća u matičnu tvrtku. Radi na više radnih mjesta u RJ Distribucija električne energije zaključno s mjestom upravitelja pogona "Pomoćne djelatnosti", a 1972. g. imenovan je glavnim direktorom 'Elektroslavonije". Na ovu dužnost je biran u više mandata, a 1990. godine prelazi na rad u direkciju Hrvatske elektroprivrede u Zagreb. Posljednje dvije godine (pred mirovinu) radi u Institutu za elektroprivredu Zagreb kao pomoćnik direktora.

Slika 2. Vladimir Tomić, *dipl. ing. el.*

Pored obavljanja funkcije direktora tvrtke Tomić je imao i niz javnih funkcija na razini grada Osijeka, u vrijeme registracije Elektrotehničkog fakulteta Osijek bio je predsjednik Savjeta ove visokoškolske ustanove te pridonio njegovom utemeljenju, prvi nastavni program fakulteta izrađen je u "Elektroslavoniji", a u suradnji s Elektrotehničkim fakultetom Zagreb i prof. dr. sc. Hrvojem Požarom pribavljena je potrebna dokumentacija za rad fakulteta. Također je sudjelovao u organiziranju Društva inženjera i tehničara grada Osijeka, vodio je obnovu Planinarskog doma Jankovac uz prikupljanje sredstava za obnovu te sudjelovao u mnogim gradskim odborima: za izgradnju gradskog kupališta „Copacabana, glavnog odvodnog kolektora, strelišta Pampas te drugim objektima. Više godina bio je predstavnik republičke elektroprivrede u vodoprivredi, gospodarskoj komori, državnoj elektroprivrednoj udruzi i sl. Za svoj rad odlikovan je Ordenom rada, dobitnik je Nagrade grada Osijeka, državne nagrade „Nikola Tesla“ te više drugih društvenih i stručnih priznanja, [10].

2.1. Sjećanje na plinofikaciju

U knjizi „40 godina HEP Plina“ objavljen je razgovor Vladimira Stanića (nekadašnjeg urednika lista „Elektroslavonija“ s Vladimirom Tomićem o procesu plinofikacije slavonske regije. Ovdje se daje dio tog razgovora.

„Na raspravi u Hrvatskom saboru o razvoju energetike zaključeno je da bi u izvanrednim situacijama bile potrebne četiri plinske elektrane po 50 MW (stavljaju se u pogon za nekoliko minuta). U prvoj fazi potrebno je bilo izgraditi dvije elektrane, jednu u Osijeku, a drugu u Zadru. Čini mi se da je to bilo u 1973. godini. Investicijski program trebalo je napraviti u veoma kratkom roku, pa su ga izradili inženjeri iz „Elektroslavonije“ i to za snagu 2 x 25 MW. Zahvaljujući našoj brzini u Republički program ušla je plinska termoelektrana Osijek te smo pristupili realizaciji projekta.

Nakon saborske odluke INA je pristupila izgradnji magistralnog plinovoda Beničanci–Osijek. Plinsku elektranu smo locirali na istočnom dijelu grada Osijeka tako da je plinovod prošao duž cijelog grada, što je kasnije omogućilo direktan priključak gradskih redukcijskih stanica, uz minimalne troškove priključnih plinovoda. Moram napomenuti da plinska elektrana može osim plina koristiti i ekstra-lako lož ulje, za što je izgrađen poseban rezervoar.

Ovdje se pojavila i dilema da li da kupujemo plin direktno od INA-e ili preko lokalnog distributera plina (kao Toplana Zagreb) što je naravno skuplje. Budući da smo, u stvari, bili

najveći kupac plina i potrošač (stara toplana i plinska termo-elektrana) odlučili smo se pojaviti kao distributer prirodnog plina za Slavoniju. "Elektroslavonija" je bila regionalni distributer električne energije i topline za grad Osijek, pa je logično bilo da se registriramo i kao distributer prirodnog plina.

U svim slavonskim općinama ishodili smo suglasnost za status distributera prirod-nog plina, naša je odluka bila logična i radi toga što smo preko električne energije već bili prisutni u svakom mjestu, domaćinstvu i poduzeću. Posjedovali smo bogato iskustvo iz široke elektrifikacije Slavonije, geodetsku dokumentaciju naselja i odgovarajući stručni kadar. Posjedovali smo mehanizaciju za iskope, bušenja ispod cesta, atestirane varioce i ostalu neophodnu mehanizaciju. Na osnovu toga osnovan je pogon za distribuciju prirodnog plina, čije smo osoblje smjestili u barake, koje su ostale nakon izgradnje plinske termo-elektrane. Nakon nekoliko godina uspjeli smo kupiti bivšu zgradu Općeg trgovačkog poduzeća Osijek, u susjedstvu naše stare toplane, u koju smo smjestili Pogon za distribuciju prirodnog plina. U samome početku prvenstveno smo nastojali priključiti veće potrošače plina, kako bismo ostvarili dohodak. "Elektroslavonija" je financirala izgradnju redukcijskih stanica, a ulična plinska mreža se financirala samodoprinosom građana - kao ranijih godina i električna mreža niskog napona.

Grad Osijek podijelili smo u područja koja grijemo iz toplinskog sistema i područja koja snabdijevamo prirodnim plinom kako ne bismo financirali nepotrebne mreže, bilo plinske ili toplinske. Potrebno je objasniti da je u područjima naselja uvođenjem prirodnog plina došlo do znatnog rasterećenja električne nisko-naponske mreže (grijanje, kuhanje) što je bitno odgađalo potrebu za pojačanjem električne mreže ili interpolaciju novih gradskih trafostanica.

Do Domovinskog rata uveli smo prirodni plin u sedam slavonskih općina. Važna je jedna opća napomena: izgradnja distributivne plinske mreže nema ekonomskog opravdanja za investitora ako nema industrijske potrošnje. Ovdje se mora priznati, da je veliki doprinos plinofikaciji dao dipl. ing. Ivan Baličević, koji se kao strojarski inženjer udubio u ovu problematiku.

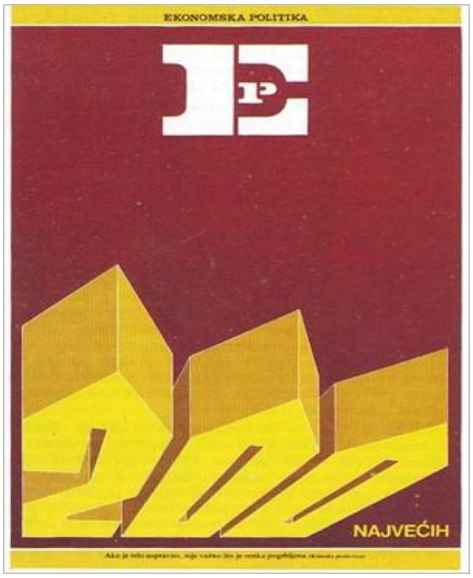
Za sve aktivnosti oko plinifikacije imali smo maksimalnu podršku Privredne komore Slavonije i Baranje, Zajednice općina Osijek i svih tada 14 slavonskih općina. Svu tehničku dokumentaciju za plinofikaciju izradili su projektanti Ekonomsko tehničkog zavoda Osijek.

Možda još jedan zanimljiv detalj: kada smo prelazili s čeličnih cijevi za plinovode na plastične (te mreže su jeftinije i brže se grade) bilo je dosta otpora od strane našeg stručnog kadra; tada smo doveli kolege inženjere iz Pečuha (Mađarska), koji su nam pokazali kako je to jednostavno raditi uz korištenje odgovarajućeg alata. Nakon toga su naši monteri išli na praksu u Pečuh.

Posljednjih godina - pred Domovinski rat - pojavila se i nestašica prirodnog plina, tako da unatoč gotovoj dokumentaciji za Vukovar, tu mrežu nismo mogli početi graditi. Mislim da je još jedan podatak zanimljiv za čitatelja; pri izgradnji Plinske termoelektrane Osijek na jednu turbinu smo postavili kotao na otpadnu toplinu (oko 500 ^{0}C) iz kojeg smo dopunski snabdijevali gradsku toplinsku mrežu, a uz minimalne troškove za toplinarstvo." [10].

2.2. „Elektroslavonija“ na rang listi najvećih poduzeća u Jugoslaviji

„Ekonomska politika“, Beograd (jugoslavenski privredni tjednik) započela je 1970. godine, po ugledu na svjetske poslovne tjednike, objavljivati listu 200 najvećih poduzeća u zemlji; tako je sačinjavana rang lista 100 (kasnije 200) najvećih u oblasti industrije, rudarstva, poljoprivrede i građevinarstva. Kriteriji za rangiranje bili su: (1) ukupni prihod, (2) dohodak uvećan za amortizaciju, (3) prosječno korištena poslovna sredstva i (4) broj zaposlenih, a na temelju izvještaja Službe društvenog knjigovodstva (SDK). Mada se ovakvome rangiranju mogu postaviti određene zamjerke, ipak, ove su rang liste bile više nego indikativna slika razvoja i snage velikih poslovnih sustava u zemlji. „Elektroslavonija“ Osijek je rezultatima svojega poslovanja dospjela prvi put na ovu listu 1986. godine (238 mjesto) i popravljala svoj rang do 1989. godine kada je bila na 89 mjestu među najvećih 200 industrijskih poduzeća u Jugo-slaviji. Tih je godina „Elektroslavonija“ imala oko 2500 zaposlenih, [11].



Slika 3. Naslovnica edicije „Ekonomska politika“ – „200 najvećih u SFRJ 1983.

3. Umjesto zaključka - „Elektroslavonija“ od 1970. do 1990.

Umjesto zaključka citirat ćemo dio teksta iz rukopisa inž. Kalea Marijana – koji je objavljen u mojoj knjizi Monografija „40. godina HEP Plina d.o.o. Osijek“; *„Elektroslavonija“ Osijek je u razdoblju inženjera Tomića kao njezina direktora – nešto kraće od 20 godina – izrasla u respektabilno elektroprivredno poduzeće. Jedino je u Hrvatskoj objedinjavalo sve tri elektroprivredne djelatnosti: proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije, uz proizvodnju i distribuciju topline te distribuciju prirodnog plina. U razdoblju 1970. -1990. godine stupanj elektrifikacije naselja u Slavoniji i Baranji porastao je s 90% na 100%, a isporučena električna energija porasla je tri puta, s oko 600 na oko 1800 milijuna kilovatsati godišnje.*

Razvoj prijenosne mreže, pored izgradnje PTE Osijek i TE-TO Osijek te slavonske plinifikacije i osječke toplifikacije, naglašeno označava to razdoblje. Od 1971. godine, saborskom je odlukom za razvoj prijenosne mreže na slavonsko-baranjskom području imenovana „Elektroslavonija" Osijek, a izgradnja te mreže dobila je republički financijski prioritet. U tom razdoblju intenzivne izgradnje prijenosne mreže broj je transformatorskih stanica 110 kilovolta na području upeterostručen - što je bitno poboljšalo naponske prilike u cijeloj distribucijskoj mreži, uz izgradnju vodova 400 kilovolta i TS 400/110 kV Ernestinovo 1977. godine. Znakovito je za „Elektroslavoniju" da ima ozbiljan Pogon pomoćnih djelatnosti u kojem se odvija projektiranje, montaža i održavanje, čak i stanovita proizvodnja opreme za distribucijsku i prijenosnu mrežu te plinifikaciju i toplifikaciju. Primjerice: izvedbene projekte, izradu raznih konstrukcijskih elemenata i montažu kompletne opreme u doista zahtjevnom (i pionirskom, u tadašnjem jugoslavenskom okviru) projektu TS 400/110 kV Ernestinovo izveli su stručnjaci i majstori „Elektroslavonije". Svemu tomu davao je naglašeni ton tadašnji čelni čovjek „Elektroslavonije", inženjer Tomić, za kojega, primjerice, uvaženi hrvatski energetičar, akademik Udovičić, tvrdi da je bio najuspješniji regionalni direktor u hrvatskoj elektroprivredi." [10].

4. Literatura

[1] Grupa autora. monografija „50 godina rada – „Elektroslavonija" elektroprivredno poduzeće Slavonije i Baranje, Osijek – 1926 -1976. „Elektroslavonija," Osijek .1977.
[2] Grupa autora. „50 g. prijenosa električne energije u Hrvatskoj", Kigen, Zagreb, 2008.
[3] Kalea, Marijan. Sjajan (i hrabar) Žanićev pristup, HEP-Vjesnik, 193, II. 2007.
[4] Kalea, Marijan. Vladimir Žanić /1926.-1971.), HEP-Vjesnik, 190/191, XI-XII. 2006.
[5] Ivanović, Milan; Tonkovič, Zlatko. Korištenje prirodnog plina u Slavoniji i Baranji od 1972. do 2014. godine; Plin' 2015; 13th Natural Gas, Heat and Water Conference, Osijek, 26-28.10.2015. Proceedings, (ISSN 1849-0638) pp 66–75
[6] Ivanović, Milan. Efikasnost korištenja energije, ISBN 953-6032-02-3, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 1991.
[7] Grupa autora. Monografija „Slavonija '85."; Privredna komora Slavonije i Baranje; 1986.
[8] Ivanović, Milan. Znanost i regionalna energetika - Istraživanja o razvoju energetike i korištenju energije u Slavoniji. ISBN 953-6032-502-3; Elektrotehnički fakultet Osijek, 2006.
[9] https://www.hep.hr/proizvodnja/termoelektrane-1560/termoelektrane-toplane/te-to-osijek/1566
[10] Ivanović, Milan. Monografija „40. godina HEP Plina d.o.o. Osijek, 1975. – 2015. ISBN 978-953-7973-14-8, HEP Plina d.o.o. Osijek i Alberta naklada, Osijek 2016.
[11] Ivanović, M.; Vidaković, S. History of Implemented Entrepreneurial Activities in Slavonia and Baranja from 1969th to 1989th; 5th International sci conference „Economy of Easter Croatia", Osijek 6, 1-3, 2016; ISSN 1848-9559, Proceedings, pp 911 – 921

Prilozi za povijest energetike Slavonije i Baranje (4)

Doprinosi Vladimira Žanića razvoju poduzeća „Elektroslavonija“ Osijek

Contributions of Vladimir Žanić to Development of the Company "Elektroslavonija" Osijek

M. Ivanović*

PANON - institut za strateške studije, Osijek, Hrvatska

*Autor za korespodenciju E-mail: panon.institut@gmail.com

Sažetak
U seriji radova 'Prilozi za povijest energetike Slavonije i Baranje' na ovom simpoziju obrađuju se početci i razvoj energetskih kapaciteta na području regije Slavonije i Baranje. U ovom se radu obrađuje osnivanje i razvoj poduzeća „Elektroslavonija“ Osijek te doprinosi direktora tog poduzeća Vladimira Žanića (1926 - 1971) energetskom razvoju regije. U zaključku se ukazuje na značaj poduzeća „Elektroslavonija“ gospodarskom i društvenom razvoju slavonsko-baranjske regije tijekom 1960-tih godina.

Ključne riječi: „Elektroslavonija“, Gospodarski razvoj, Slavonija, Povijest slavonske energetike, Vladimir Žanić

Abstract
In the series of papers 'Contributions to the history of energy in Slavonia and Baranja', this symposium examines the beginnings and development of energy capacities in the region of Slavonia and Baranja. This paper examines the establishment and development of the company "Elektroslavonija" Osijek and the contributions of the company's director, Vladimir Žanić (1926 - 1971), to the energy development of the region. The conclusion points out the importance of the company "Elektroslavonija" to the economic and social development of the Slavonia-Baranja region during the 1960s.

Keywords: "Elektroslavonija", Economic development, Slavonia, History of Slavonian energy, Vladimir Žanić

1. "Elektroslavonija"- temeljno poduzeće za elektrifikaciju slavonsko-baranjske regije

Elektroprivredno poduzeće “Elektroslavonija” iz Osijeka se razvilo iz nekadašnjeg Gradskog poduzeća "Osječka munjara i tramvaj" koje je osnovano u Osijeku 1926. godine kao posebna ustanova Gradske općine. Munjara (električna centrala) je zvanično puštena u pogon 17. prosinca 1926. godine - što je označilo početak javne proizvodnje električne energije radi korištenja u domaćinstvima i industriji, za javnu rasvjetu i električni tramvaj - koji je zamijenio do tada korišteni konjski tramvaj, [1].

Slika 1. Zgrada termoelektrane Osijek pri završetku izgradnje 1926, godine [2]

Radi lakšeg i profitabilnijeg poslovanja (evidencija i obrada kupaca) poduzeća „Munjara – Tramvaj“ i „Vodovod“ spojena su 1929. godine u jedinstvenu tvrtku pod nazivom *"Munjara, tramvaj i vodovod općine slobodnog i kraljevskog grada Osijeka"*. Nakon Drugog svjetskog rata **-** potkraj 1945. godine - iz dotadašnjeg poslovanja izdvojen je tramvajski prijevoz (u novu komunalnu tvrtku), a energetski dio munjare nastavio je raditi; od 1.1.1946. godine poduzeće postaje podružnica novo-osnovanog nacionalnog poduzeća ELPOH Zagreb (Električno poduzeće Hrvatske). Godinu dana kasnije osječko poduzeće se osamostaljuje te od 1. siječnja 1947. godine posluje pod poznatim imenom "Elektroslavonija" - elektroprivredno poduzeće Osijek. Novo poduzeće ima 11 područnih ureda: Donji Miholjac, Đakovo, Našice, Nova Gradiška, Podravska Slatina, Slavonska Požega, Slavonski Brod, Valpovo, Vinkovci i Vukovar. U ovom je razdoblju broj zaposlenih bio relativno malen (procjenjuje se do dvije stotinu radnika), a prve godine rada obuhvaćale su isključivo obnovu elektroenergetskih vodova i pogona te elektrifikaciju naselja.

Na području Slavonije i Baranje početkom 1941. godine u pogonu je bio 21. elektroenergetski proizvodni objekt - male lokalne i industrijske elektrane (dizel agregati, termo-elektrane na ugljen i jedna mala hidroelektrana) - koji su napajali svoje industrijske pogone i kotarska mjesta na području regije. Sva ostala naselja bila su bez električne

energije. Tijekom II. svjetskog rata u bombardiranju savezničkih snaga u gradu Osijeku (1944.) pogođena je i termoelektrana, a stradale su (od strane okupatora prilikom njihovog povlačenja) i elektrane u Vukovaru, Slavonskom Brodu i Slavonskoj Požegi. Isto tako stradale su i mjesne distribucijske mreže. Najnepovoljnije stanje mreže (34 km) bilo je u Slavonskom Brodu – jer je grad bio bombardiran 30 puta, [3]. U to vrijeme u Hrvatskoj nije postojao elektroenergetski sustav nego izolirani manji termo-energetski i hidro-energetski izvori s lokalnim konzumom. Samo na području Dalmacije, Zagreba i Rijeke mogli su se nazrijeti začeci elektro-energetskog sustava, [4]. Koliko je stanje bilo nepovoljno najbolje prikazuje slika prijenosne mreže u Hrvatskoj 1956. godine; sl. 2.

Slika 2. Prijenosna mreža Hrvatske 1956. godine [4]

Na području slavonske regije mnoga proizvodna i distributivna postrojenja stradala su tijekom rata te su morala biti obnavljana tako da je potrošnja električne energije dosegnula predratnu razinu (543 GWh) tek 1948. godine. Godine 1945. na području Hrvatske samo je 13% elektrificiranih naselja, odnosno 20 % elektrificiranih kućanstava. Tablicama 1 i 2 prikazani su postoci elektrificiranost naselja i domaćinstava na području Hrvatske i slavonsko-baranjske regije.

Poteškoće u procesu elektrifikacije u Hrvatskoj, kao i slavonskoj regiji, proizlazile su zbog ograničenih financijskih sredstava, nedostatka tehničke opreme i alata te nedovoljnog stručnog kadra. To je vrijeme centralnog državnog planiranja I općih investicijskih fondova; koje je trajalo do 1965. godine.

„Elektroslavonija“ se u razdoblju 1950.-1960. razvijala snažnim tempom proširujući djelatnosti i povećavajući broj zaposlenih uz poboljšanje njihove kvalifikacijske strukture. U

tome procesu zaslužni su mnogi kvalificirani radnici, elektromonteri, inženjeri i rukovodeći kadar. Posebno treba ukazati na zasluge Vladimira Žanića koji je bio glavni direktor „Elektroslavonije“ u razdoblju dinamičnog razvoja od 1965. do 1971. godine,

Tablica 1. Elektrificiranost naselja i kućanstava u Hrvatskoj [3] [4] [5]

Godina	Postotak naselja	Postotak kućanstava
1948.	13	20
1950.	21	32
1954.	36	46
1960.	57	63
1965.	80	81
1970.	95	95
1980.	99	99
1990.	100	100

Tablica 2. Elektrificiranost naselja i kućanstava na području Slavonije i Baranje [2]

Godina	Postotak naselja	Postotak kućanstava
1948.	Nema podataka	Nema podataka
1953.	10	Nema podataka
1956.	11	Nema podataka
1965.	70	Nema podataka
1967.	75	Nema podataka
1971.	93	Nema podataka
1986.	100	100

2. Vladimir Žanić (1926.-1971.) - životopis

Vladimir Žanić je rođen 1926. godine u Đurđenovcu, položio je stručni ispit za zvanje višeg specijaliste auto-elektromehaničara 1951. godine, te diplomirao (uz rad) 1961. godine na Višoj radničkoj školi u Osijeku. U „Elektroslavoniji“ Osijek zaposlen je od 1953. godine u proizvodnom odjelu gdje ubrzo postaje šef pogona proizvodnje. Potom je unaprijeđen za upravitelja pogona distribucije te početkom 1960. postaje pomoćnik direktora na kojoj je funkciji 4 godine. Godine 1965. izabran je za glavnog direktora poduzeća „Elektroslavonija“ Osijek.

U tome prijelomnom razdoblju (doba napuštanja centralnog planiranja i uvođenja elemenata tržišne ekonomije te značajnih političkih i ideoloških razilaženja u vladajućoj komunističkoj partiji) teško je bilo razvijati poduzeća infrastrukturnog sektora. Kako svjedoči Marijan Kalea, elektroslavonski inženjer iz toga doba (i jedan od vrlo uvaženih stručnjaka u elektroenergetici na razini Hrvatske i Jugoslavije) – „*bilo je to vrijeme svakojakih oskudica, bez dovoljno stručnjaka i bez dovoljno sredstava za investicije, a s rastućim potrebama za*

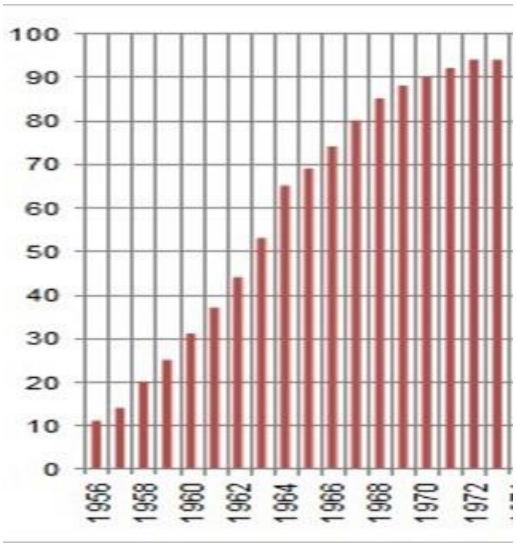
električnom energijom. Tada su bila potrebna znanja, umijeća i hrabrosti da se donose strateške odluke, preuzima odgovornost i maksimalno mobilizira što stručnije suradnike za velike projekte"; u to doba bilo je u „Elektroslavoniji" manje od desetak elektroinženjera). *Vladimir Žanić ima niz zasluga za razvoj elektroenergetike i energetike na području Slavonije i Baranje",* [6].

Ovdje ćemo ukazati na bitne pomake za koje je - uz radnike i stručnjake - zaslužan Vladimir Žanić, a koji su ostva-reni u: (a) elektrifikaciji regije Slavonija i Baranja, (b) Izgradnji i razvoju prijenosne mreže u Slavoniji i Baranji, (c) Izgradnji transformatorske stanice 400 kilovolta u Ernestinovu, (d) Toplifikaciju grada Osijeka i (e) Osnivanju i izgradnju Pogona pomoćnih djelatnosti „Elektroslavonije" Osijek.

Slika 3. Vladimir Žanić [7]

2.1. Elektrifikacija Slavonije i Baranje

Žanić je zaslužan ponajprije za okončanje široke elektrifikacije naselja na području Slavonije i Baranje. Kao šef proizvodnog pogona kao i upravitelj distribucije bio je angažiran i na poslovima elektrifikacije naselja u slavonsko-baranjskoj regiji; godine 1965. (kada postaje direktor) elektrificiranost naselja narasla je na 70%, a 1971. godine (kada tragično strada u automobilskoj nesreći) već je 93% naselja u regiji bilo elektrificirano (graf. 1). Potrošnja električne energije na području Slavonije i Baranje se u tih šest godina udvostručila.



Grafikon 1.
Postotak elektrificiranih naselja na području Slavonije i Baranje [6]

2.2. Razvoj prijenosne mreže u Slavoniji i Baranji

Vladimir Žanić, kao direktor „Elektroslavonije", zaslužan je „*za donošenje tzv. saborskog programa razvoja prijenosne mreže u Slavoniji i Baranji, koji je konačno usvojen 1969. godine, a po kojem je financiranju izgradnje prijenosne mreže u slavonskoj regiji dodijeljen prioritet jednak prioritetu financiranja izgradnje elektrana na drugim područjima Hrvatske; to s obzirom da je prijenosna mreža u Slavoniji i Baranji imala ulogu „izvora" električne energije, jer izvora primarne energije na našem području nije bilo",* [6].

Tako je prema koncepciji razvoja „Elektroslavonije“, početkom siječnja 1971. godine utemeljena Radna jedinica elektroprijenosne djelatnosti (prijenos na visokom naponu) sa sjedištem u Osijeku – koja je kasnije prerasta u OOUR (poduzeće) u sastavu „Elektroslavonije“. Tako je „Elektroslavonija“ Osijek postala četvrto elektroprivredno poduzeće u Hrvatskoj, jer do tada je poduzeće obavljalo samo distribuciju električne energije.

SAVJETOVANJE O ELEKTROPRIVREDI HRVATSKE

ELEKTROPRIVREDA U NOVIM UVJETIMA

Predsjednik Republičkog vijeća sindikata Hrvatske Milutin Baltić prisustvovao savjetovanju o elektroprivredi koje je održano u Zagrebu — U diskusiji između ostalih sudjelovao Vladimir Žanić direktor »Elektroslavonije«

KOJIM PUTEM DALJE U ELEKTROPRIVREDI: Vladimir Žanić

V. STANIĆ

Slika 4. Članak u listu „Elektroslavonija“ o istupu Vladimira Žanića [7]

2.3. Izgradnja transformatorske stanice 400 kV u Ernestinovu

Direktor Žanić zaslužan je za donošenje strateške odluke o lociranju transformatorske stanice 400 kV u Ernestinovu. Naime, prema tadašnjem pristupu u vodećim elektroprivrednim krugovima Hrvatske važan transformatorski objekt trebao se locirati po prvoj varijanti u Tuzli, odnosno, u drugoj varijanti u Đakovo. Na nizu stručnih sastanaka vodstvo i stručnjaci „Elektroslavonije“ su zastupali stav o potrebi izgradnje te trafostanice na lokaciji bliže Osijeku kao velikom industrijskom centru i velikom potrošaču električne energije. Nakon upornih nastojanja transformatorska stanica 400 kV izgrađena je u Ernestinovu.

Slika 5. Pogon pomoćnih djelatnosti „Elektroslavonije“ Osijek (1970.) [7]

Anegdota o elektronskom mozgu

Krajem 60-tih godina XX. stoljeća osobno sam imao intenzivnije kontakte s direktorom Žanićem u pripremama za izgradnju mreže 400 kilovolta u Slavoniji i Baranji. Iz toga doba je i ova anegdota. Na elektroničkom računalu IBM-360 s bušenim karticama kao ulaznim medijem (tada jedinom u Osijeku) računali smo težište elektroenergetskog opterećenja područja Slavonije i Baranje, dokazujući i time da lokacija Tuzla ili Đakovo nisu pogodne za čvornu opskrbnu stanicu ovog područja, već da je to šire područje Ernestinova. Debeo svežanj računalnih izlista (papira sa zeleno-bijelim uzdužnim crtama, formata A3), bio je rezultat tih izračuna izvedenog u više varijanti. Direktor Žanić je stalno nosio taj svežanj papira u službenom automobilu - *„nikad se ne zna kad će zatrebati“* u putovanju na sastanke u Zagreb i Beograd - u nastojanju pridobiti odgovorne u elektroprivrednom sektoru za lokaciju Ernestinovo. Tada bi slavodobitno znao reći *„To je izvan svake sumnje optimalna lokacija – moji dečki su to izračunali na elektronskom mozgu, vidite rezultate!“*. I tada bi pljusnuo onu debelu knjižurinu na stol, impresionirajući tako prisutne pozivanjem na *elektronski mozak* – što je u to doba u nas doista predstavljalo tehnološki iskorak i uzimalo se – a priori – s respektom, [6].

Okvir 1.
Svjedočenje Kalea Marijana

2.4. Toplifikacija grada Osijeka

Gradska termoelektrana snage 2 MW (izgrađena 1926. godine) sredinom 1960-tih je (u sustavu elektroprivrede) bila sve manje tehnički pouzdan i ekonomski rentabilan proizvodni objekt. Zalaganjem Vladimira Žanića i njegovih suradnika Termoelektrana Osijek je 1963. godine preorijentirana na proizvodnju topline; od tada i postoji Toplana u Osijeku te započinje toplifikacija grada Osijeka. Osijek je bio prvi grad u Jugoslaviji u kojem je izvršena podjela grada na zonu plinofikacije i zonu toplifikacije; toplinska mreža se gradila u naseljima višekatnih zgrada, jer je centralizirano grijanje (putem toplane) nerentabilno za obiteljske kuće, [8]. U vrijeme direktorskog mandata Vladimira Žanića proizvodnja toplinske energije se u Osijeku udeseterostručila.

2.5. Izgradnja Pogona pomoćnih djelatnosti „Elektroslavonije“ Osijek

Pomoćne djelatnosti u „Elektroslavoniji“ – elektromontažna, strojobravarska i stolarska radionica, tokarija, skladište, automehaničarska radionica, baždarnica brojila i druge pomoćne djelatnosti - bile su smještene u dvorištu stare elektrane u Osijeku, a trafo-radionica uz TS 110/35 kV Osijek 1 (na Brijestu). Ovi su radni prostori bili ne uvjetni i te su službe u skučenim prostorima funkcionirale uz značajne poteškoće. U isto vrijeme „Elektroslavonija“ je - u to doba - nastojala na objedinjavanju sve tri elektroprivredne djelatnosti (proizvodnja, prijenos i distribucije električne energije) u Slavoniji i Baranji „*pod jednim krovom*“. Shodno tome - takva organizacija pomoćnih djelatnosti (za sve te tri elektroenergetske djelatnosti) bila je poželjna, čak i nužna - iz više poslovnih (organizacijskih, tehnoloških, financijskih i kadrovskih) razloga, [9].

Sagledavši te činjenice i argumente direktor Žanić se kod nadležnih izborio za novu i veću lokaciju novoga (budućeg) pogona pomoćnih djelatnosti – u industrijskoj zoni na istočnom prilazu gradu Osijeku - na Zelenom polju. Tako je i raspisao natječaj za idejno rješenje, i poslao grupu inženjera da obiđu takve pogone u sličnim poduzećima. Na rečeni natječaj su pristigla tri rješenja. Skupina za izbor, sastavljena od tada malobrojnih stručnjaka iz poduzeća, inženjera i ekonomista, predložila je da se usvoji rad arhitekta Borisa Krstulovića (Zagreb); radilo se o nekonvencionalnom, tada ultra modernom rješenju - za koje je autor za to djelo, kasnije, dobio saveznu nagradu (dnevnog lista „Borba). Glavni direktor Elektroslavonije Žanić je prihvatio te prijedloge i pokrenuo realizaciju.
Gradnja Pogona pomoćnih djelatnosti dovršena je 1970. godine. U Pogonu su smješteni: automehaničarska radionica s natkrivenom i otvorenom garažom, baždarnica brojila, strojobravarska, bravarska i stolarska radionica, elektromontaža, lakirnica, veliko natkriveno i otkriveno središnje skladište poduzeća, trafo-radionica, radionica za popravak visoko-naponskih aparata i visoko-naponska ispitna stanica (s originalnim rješenjem vađenja transformatora). Pogon je imao i željeznički priključak za dovoz krupne opreme i materijala. U krugu Pogona, izveden je restoran za zaposlene, ambulanta, knjižnica, dvorana za velike skupove, te rekreacijski centar s kuglanom, prostorom za stolni tenis i otvorenim bazenom, te igralištima za rukomet/mali nogomet, košarku, odbojku i tenis.

Slika 6. Baždarnica brojila u Pogonu pomoćnih djelatnosti (1970.) [7]

Kasnije je (1977. godine) na rubu parcele Pogona pomoćnih djelatnosti izgrađena je zgrada Računsko-dispečerskog centra s prostorom za Elektronski računski centar, Centar daljinskog upravljanja prijenosnom mrežom, Distribucijski dispečerski centar Osijek, te Projektni odjel i središnju arhivu poduzeća. U tom objektu, od tada, smještena je i glavnina rukovodnog i pogonskog osoblja Prijenosnog područja Osijek.

3. Umjesto zaključka

Vladimir Žanić bio je glavni direktor „Elektroslavonije“ Osijek u razdoblju 1965. do tragične pogibije, 1971. godine. Za svoj rad i rezultate rada Žanić je 1967. godine dobio najveće priznanje Grada Osijeka – „Privrednu nagradu grada Osijeka“. Možemo zaključiti da je Vladimir Žanić, zaslužan što je „Elektroslavoniju“ - od lokalnog elektrodistribucijskog poduzeća uz pomoć svojih suradnika, razvio u respektabilno elektroprivredno poduzeće u Hrvatskoj koje je bilo vrlo značajno za gospodarski rast slavonsko-baranjske regije kao i kvalitetu života stanovnika ove regije.

31. XII 1967.

U POVODU DANA REPUBLIKE URUČENA »PRIVREDNA NAGRADA GRADA OSIJEKA«

PRIZNANJE KOJE OBAVEZUJE

Direktor poduzeća Vladimir Žanić nagrađen je Privrednom nagradom grada Osijeka — Predsjednik Općinske skupštine Osijek uručio nagade dobitnicima

NAJBOLJI OSJEČKI PRIVREDNICI, PRIMILI SU 28. NOVEMBRA PRIVREDNE NAGRADE GRADA OSIJEKA.

NAGRADE JE U KLUBU SPORTSKIH RADNIKA U PRISUSTVU MNOGOBROJNIH DRUŠTVENO-POLITIČKIH RADNIKA I PRIVREDNIKA URUČIO PREDSJEDNIK OPĆINSKE SKUPŠTINE MILENKO RADUŠINOVIĆ.

PRIVREDNU NAGRADU ZA KOLEKTIVE — PLAKETU DOBILI SU: »SAPONIA«, NAMA I »ANALIT«, A DIPLOMU »TEHNIKA-BETON«. POJEDINAČNE DIPLOME I NOVČANE NAGRADE U IZNOSU OD 2.000.— N. DIN DOBILI SU: VLADIMIR ŽANIĆ, DIREKTOR »ELEKTROSLAVONIJE«, IVO MARTINAC, DIREKTOR »SAPONIJE«, LUJO FLAJŠAHER, DIREKTOR »PIVOVARE«, VLADIMIR KOS, DIREKTOR »TEHNIKA-BETON«, IVO ANDRIĆ KOMEREC, DIREKTOR »NAME«, MIRKO VRKIĆ, V. D. RUKOVODILAC TEHNIČKOG SEKTORA INDUSTRIJE MODNE KONFEKCIJE »SLAVONIJA«.

Nakon čiro su podijeljene nagrade, u ime nagrađenih zahvalio se direktor naše poduzeća Vladimir Žanić i izmedu ostalog rekao:

— Osnoviđitnje nagrade u čast Dana Republike, veliko su priznanje osječkim privrednicima. One će

Ocjenjivačka komisija za dodjelu privredne nagrade grada Osijeka, dala je odborničima Privrednog vijeća obrazloženje zašto je Vladimir Žanić, direktor »Elektroslavonije« predložen za dodjelu pojedinačnog priznanja. U tom obrazloženju navodi se:

— Svojom neposrednošću i drugarstvom, radnim navikama i upornošću u radu Vladimir Žanić postizavao je izvanredne rezultate na svim funkcijama od 1953. godine, kada je došao u kolektiv, na kojima se do sada nalazio, te osvojio simpatije sredine u kojoj živi i radi.

— Neposrednim rukovođenjem i velikim entuzijazmom drug Žanić je u godinama reforme i restrikcije kredita nastojao uvećati investicije dobrim dijelom na planirano oborđivanje poslova i pojavovremeni završetak rekonstrukcije i izgradnje Toplane u Osijeku. Danas se Osijek ubraja među vrlo nekoliko gradova u zemlji, gdje je uspjelo riješeno zagrijavanje stanova kao i osiguranje tehnološke pare u dovoljnim količinama.

— Izgradnja parovoda u Osijeku

topifikacije Osijeka, zbog čega je čitava realizacija u velikom dijelu njegova lična zasluga i djelo.

Obrazloženje ocjenjivačke komisije, da se dodjeli Privredna nagrada grada Osijeka za 1967. godinu Vladimiru Žaniću, odbornici Privrednog vijeća Općinske skupštine jednoglasno su usvojili.

Odbornici Privrednog vijeća Općinske skupštine na sjednici, koja je održana 27. studenog, na prijedlog ocjenjivačke komisije za dodjelu »Privredne nagrade grada Osijeka«, dodjelili su povodom Dana Republike, Privrednu nagradu — plaketu kolektivima »Saponia«, »Narodni — Magazin«, i »Analit«, a diplomu kolektivu »Tehnika-Beton«.

Te nagrade, koje se sada dodjeljuju po četverti put otkako je ustanovljena nagrada, obrazložene su uspjesima tih radnih organizacija, koje su postigli posebno u toku devet mjeseci ove godine.

Dvostruko priznanje Saponiji

Tvornica sapuna, kozmetičkih i

Slika 7. Članak u listu „Elektroslavonija“ o nagradi Vladimiru Žaniću [7]

4. Literatura

[1] Kalea, Marijan. Henglov izvor svjetla, pogonske sile i udobnijeg kretanja: HEP Vjesnik 126/127, srpanj/kolovoz, 2001.
[2] Grupa autora. monografija „50 godina rada – „Elektroslavonija“ elektroprivredno poduzeće Slavonije i Baranje, Osijek – 1926 -1976. „Elektroslavonija,“ Osijek .1977.
[3] Grupa autora. monografija „Slavonija '80“: Privredna komora Slavonije i Baranje, Osijek, 1980.
[4] Grupa autora. „50 godina prijenosa električne energije u Hrvatskoj“, Kigen, Zagreb, 2008.
[5] Cvetković, Z; Markovčić, B; Šimundi, N. - Elektroprivredna djelatnost u Hrvatskoj od 1918. do 1990. godine - u Grupa autora, „Stoljeće hrvatske elektroprivrede“, Hrvatska elektroprivreda, d.d. Zagreb, 1995., str. 81 – 138
[6] M. Kalea: Vladimir Žanić /1926.-1971.), HEP-Vjesnik, 190/191, XI-XII. 2006.
[7] Foto-arhiv „Elektroslavonije“, Osijek
[8] Milan Ivanović – monografija „40 godina HEP Plina Osijek, 1975.-1015.,“ HEP Plin, Osijek, 2016.
[9] Kalea, Marijan. Sjajan (i hrabar) Žanićev pristup, HEP-Vjesnik, 193, II. 2007.

Energy Footprint of Colour: Integrating Colour Science into Energy-Efficient Textile Processing

M. Glogar[1,*]

[1]University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb, Croatia

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: martina.glogar@ttf.unizg.hr

Abstract: Textile colour quality is conventionally evaluated through colourimetric parameters, while the energy required to achieve the specified colour is considered as part of the overall production process. This paper proposes the Energy Footprint of Colour (EFC) as a conceptual framework linking these two aspects. EFC is defined as the cumulative thermal and electrical energy required to achieve a specified textile colour on a defined substrate under defined technological conditions. Published studies demonstrate that energy demand depends on both colour requirements and the technological route, including dye concentration, pretreatment, process conditions, washing, drying and process optimisation. An illustrative case study using experimental colour-matching data further shows that the same target colour may require different degrees of recipe adjustment on different textile structures. The proposed EFC framework therefore introduces energy demand as an additional criterion for comparing technological routes that satisfy the required colour-quality tolerance.

Key words: Energy Footprint of Colour, textile colouration, energy efficiency, colour management

1. Introduction

Color is conventionally considered primarily as a visual and colorimetric quality attribute, while the energy required to achieve it is included within the overall energy demand of the manufacturing process. Existing environmental indicators, such as carbon footprint, water footprint, and life-cycle assessment, provide essential information on the environmental performance of textile products and processes; however, they do not specifically address the technological pathway required to obtain an individual target color. Achieving a specified textile color is not a single-step operation performed directly at the industrial scale. In conventional textile production, a target color is first translated into a dye formulation, which is developed and verified using small laboratory samples. The resulting color is instrumentally evaluated against the target standard, and the recipe is adjusted when the color difference exceeds the predefined tolerance. Once an acceptable match has been obtained, the recipe is transferred to industrial-scale production, where color quality is verified again. This laboratory-to-production workflow is essential because optimization directly on full-scale production batches would result in unacceptable consumption of materials, energy, water, chemicals, and production time. The efficiency of this workflow

depends strongly on the accuracy of color measurement, recipe prediction, and process control. Each additional laboratory trial consumes relatively small amounts of resources; however, repeated trials increase the cumulative use of dyes, auxiliaries, water, energy, and development time. Also, insufficiently accurate recipe prediction or unsuccessful scale-up may require shade correction, re-dyeing, additional washing, or, in extreme cases, rejection of an industrial batch. Modern digital color-management systems aim precisely to minimize these iterations by improving recipe prediction, color measurement, and right-first-time matching [1]. In this sense, accurate color management is not only a quality-control tool but also an important component of resource- and energy-efficient textile production. In addition, achieving the same apparent or specified color does not necessarily require the same technological pathway. Dye type and concentration, textile substrate, pretreatment, liquor ratio, temperature and time profile, fixation, washing, and drying conditions may all influence both the final color and the energy required to obtain it. Consequently, two production routes may satisfy the same color-quality requirement while differing substantially in their cumulative energy demand.

This distinction forms the basis of the energy footprint of color (EFC) concept, which does not describe the energy consumption of the color itself but the cumulative energy demand of the technological pathway required to achieve an acceptable target color on a defined textile substrate. Therefore, the concept shifts the question from *how much energy does a particular dyeing process consume?* to *determine the amount of energy required to achieve the specified color within an acceptable tolerance.*

Reducing this energy demand is consistent with the broader transition towards sustainable textile manufacturing. The textile industry is recognized as a resource- and energy-intensive manufacturing sector, with wet processing, including pretreatment, dyeing, printing, washing, drying, and finishing, representing a particularly important area for improving energy and resource efficiency. European sustainability policies, including the European Green Deal, the Circular Economy Action Plan, and the EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles, further reinforce the need to reduce resource consumption, greenhouse-gas emissions, and environmental impacts throughout textile production [2-5]. The aim of this study is to introduce the Energy Footprint of Color (EFC) as a conceptual link between color science and energy-efficient textile processing. Based on published data on the energy and environmental impacts of textile coloration and an experimental case study of color-recipe correction on different cotton structures, this study examines how color achievement, color tolerance, and technological effort can be considered together. The proposed concept does not replace conventional color-quality parameters or established environmental indicators; rather, it introduces energy demand as an additional criterion for selecting the most energy-efficient technological route among alternatives capable of producing an acceptable target color.

2. Literature rewiev

From an energy-engineering perspective, textile colour can be regarded as the result of a sequence of energy-consuming technological operations. To obtain a specified colour, the textile material is processed under defined conditions of temperature, time, water volume

and chemical concentration. Thermal energy is required primarily for heating and maintaining process baths and for drying, while electrical energy is consumed by pumps, circulation systems, processing machinery and control equipment. The total energy demand therefore depends not only on the dyeing operation itself, but on the complete technological route required to achieve the specified colour. The energy demand associated with textile colouration is determined by both the colour to be achieved and the technological route used to achieve it. The target colour influences the required dye type and concentration and may impose specific processing conditions, while energy consumption is simultaneously determined by parameters such as temperature, process duration, water volume, pretreatment, washing and drying. These two aspects cannot therefore be considered independently: different colours may require different energy inputs within the same production system, while the same or visually similar colour may be achieved through technological routes with different energy demands [6-9].

The studies reviewed below examine different aspects of this relationship, including colour depth and dye concentration, process conditions, alternative pretreatments, energy consumption and carbon footprint. Together, they provide the experimental basis for considering colour requirements and technological energy demand as interconnected rather than separate aspects of textile colouration. Zhu et al. (2024) evaluated the carbon footprint of 25 industrially produced cotton knitted fabrics coloured using different reactive-dye recipes. The mean carbon footprint was 7505.12 kg CO_2 eq per tonne of fabric, with energy consumption accounting for 78.69% of the total impact. Considerable variation was observed: the difference between the highest and lowest carbon footprints was 4437.90 kg CO_2 eq per tonne when the undyed white fabric was included and 3546.55 kg CO_2 eq per tonne when only dyed fabrics were compared. These figures represent ranges between products, not individual carbon-footprint values. Importantly, carbon footprint did not increase proportionally with dye concentration or colour depth because steam consumption, processing time, liquor ratio, pretreatment and chemical consumption also affected the result. The study therefore demonstrates that the environmental impact of achieving a colour depends on the complete technological route rather than on colour depth alone [10]. Complementary studies have examined energy efficiency in textile colouration from different technological perspectives. Chowdhury et al. evaluated the complete dyeing-to-finishing process of cotton/polyester fleece fabrics, combining energy assessment with colour strength (K/S), colour fastness and product quality. Their results demonstrated the potential for reducing energy use through process optimisation while maintaining consistent colour and textile performance [11]. Parisi et al. compared conventional and innovative wool dyeing routes using 1 kg of coloured fabric as the functional unit. The innovative process combined plasma pre-treatment with modified auxiliaries and a lower dyeing temperature (88 °C instead of 98 °C). Plasma pre-treatment required about 150 kJ of direct energy compared with 540 kJ for conventional wet pre-treatment, while the cumulative energy demand of the complete dyeing route decreased from 108 to 48.9 MJ kg^{-1} of coloured fabric. The study therefore demonstrates that changes in individual technological stages can substantially affect the total energy required to produce a coloured textile [12]. Rade et al. examined the same problem from a process-optimisation perspective by varying temperature, processing

time and the mass-to-liquor ratio (MLR) in dark-shade cotton yarn dyeing. Their thermal analysis, performed for approximately 1 kg of cotton yarn, showed that optimisation reduced heat loss from 6889.12 to 5567.51 kJ, corresponding to an energy saving of 1321.61 kJ (approximately 20%), while maintaining the required dyeing quality [13]. Kim et al. demonstrated this relationship directly in a pilot-scale reactive dyeing process by integrating real-time colour and process monitoring with a digital twin. Process optimisation reduced dyeing time by 17.5%, electricity consumption from 2.5 to 2.2 kWh and steam consumption from 27.2 to 23.9 kg, while the colour difference between the conventional and optimised processes remained within ranges of tolerance. The study therefore provides a practical example of achieving essentially equivalent colour quality with a lower energy demand [14]. At the industrial scale, Yılmaz et al. analysed long-term energy and production data from a yarn-dyeing plant. Natural gas accounted for 77.66% and electricity for 22.34% of the reported energy consumption, while an energy audit identified measures with an estimated electricity-saving potential of approximately 342,500 kWh year^{-1}. An LSTM model predicted electricity consumption with a MAPE of 0.448%, demonstrating the potential of production data and predictive modelling for energy management in textile dyeing [15].

Together, these studies show that the energy associated with textile colouration can be reduced at different stages, from pretreatment and dyeing to washing and process control, while maintaining the required colour quality. They therefore provide complementary evidence for linking colour requirements with the energy performance of the technological route used to achieve them.

3. Proposal of the Energy Footprint of Colour Concept

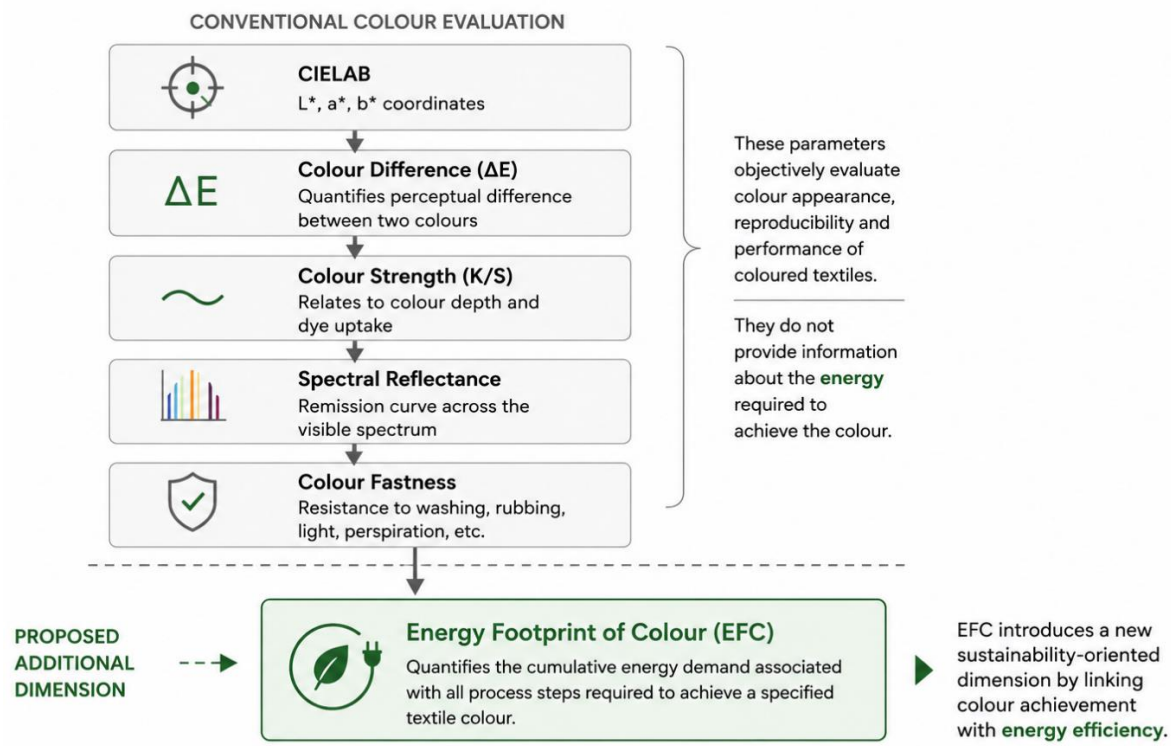


Figure 1. Position of the proposed Energy Footprint of Colour (EFC) within conventional colour

Conventional textile colour evaluation is primarily concerned with the result of the colouration process. Instrumental measurements determine the colour coordinates of a textile and quantify its difference from a reference colour, while additional parameters describe colour strength and performance. Together, these measurements provide an objective basis for assessing colour quality and reproducibility, but they contain no information about the energy expenditure associated with achieving the measured result. Figure 1 illustrates this conceptual distinction and the position of EFC as an additional energy-related dimension of colour evaluation. Two textile colouration routes may produce colours that are equally acceptable according to conventional quality criteria while requiring different amounts of thermal and electrical energy. Energy demand is influenced by both the colour requirement and the technological conditions needed to achieve it, including dye concentration, pretreatment, process temperature and duration, washing, drying and possible correction steps. Consequently, neither colour depth nor dye concentration alone can be used as a direct indicator of energy demand.

Figure 2 illustrates this relationship. The left side summarises published evidence showing that increasing colour depth does not necessarily produce a proportional increase in environmental or energy demand because other technological factors also contribute to the result. The right side presents the proposed EFC principle: when several technological routes can achieve the required colour within the accepted quality tolerance, their energy demand can become an additional criterion for selecting the preferred route.

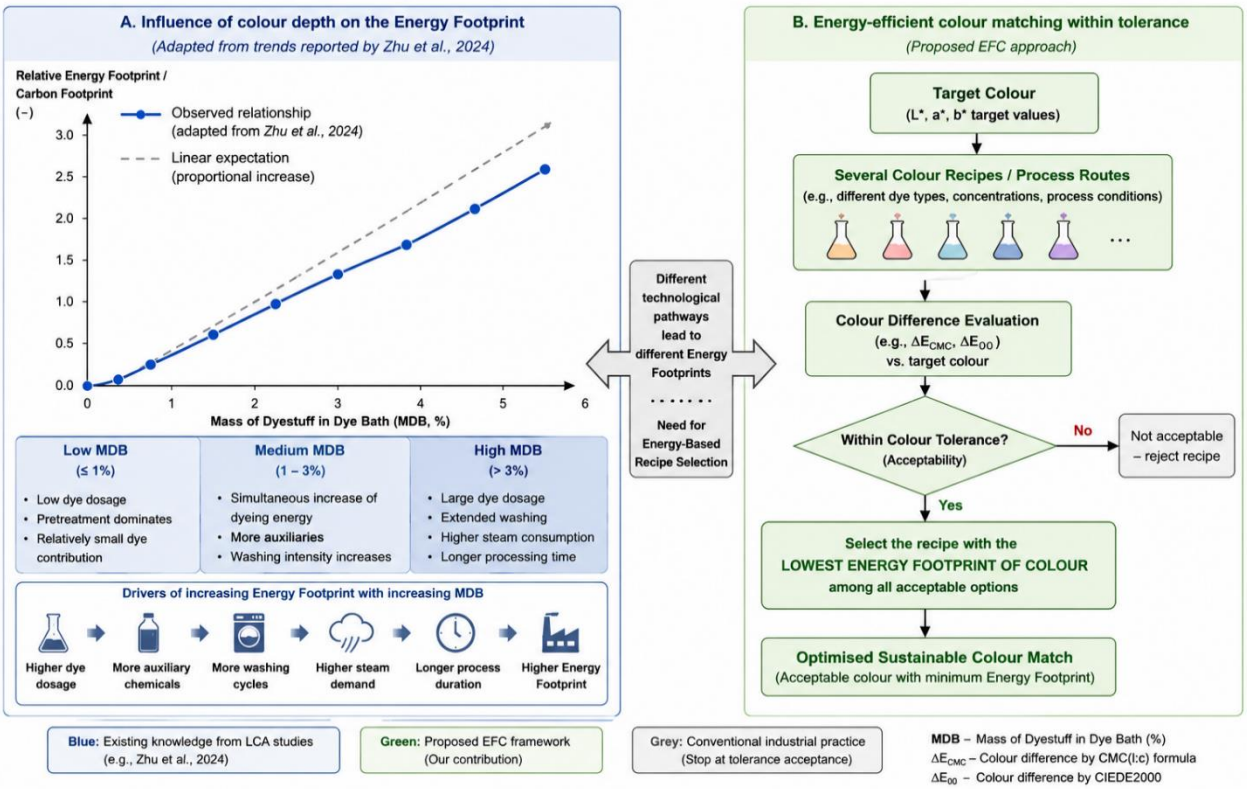


Figure 2. Conceptual relationship between colour requirements, technological routes and energy-efficient colour matching.

The Energy Footprint of Colour (EFC) is defined as the cumulative thermal and electrical energy required to achieve a specified textile colour on a defined substrate under defined technological conditions. EFC is not intended to replace conventional energy or environmental indicators, such as energy consumption, carbon footprint or life-cycle assessment, nor conventional colour-quality parameters. Instead, it links the required colour outcome with the energy demand of the technological pathway used to achieve it.

Figure 3 defines the process boundaries considered within the proposed framework. Depending on the production route, energy may be consumed during textile preparation, dyeing or printing, fixation, washing and drying. Colour-management activities, including recipe formulation, measurement and correction, can influence this demand by determining the number and intensity of processing steps required to reach the target colour.

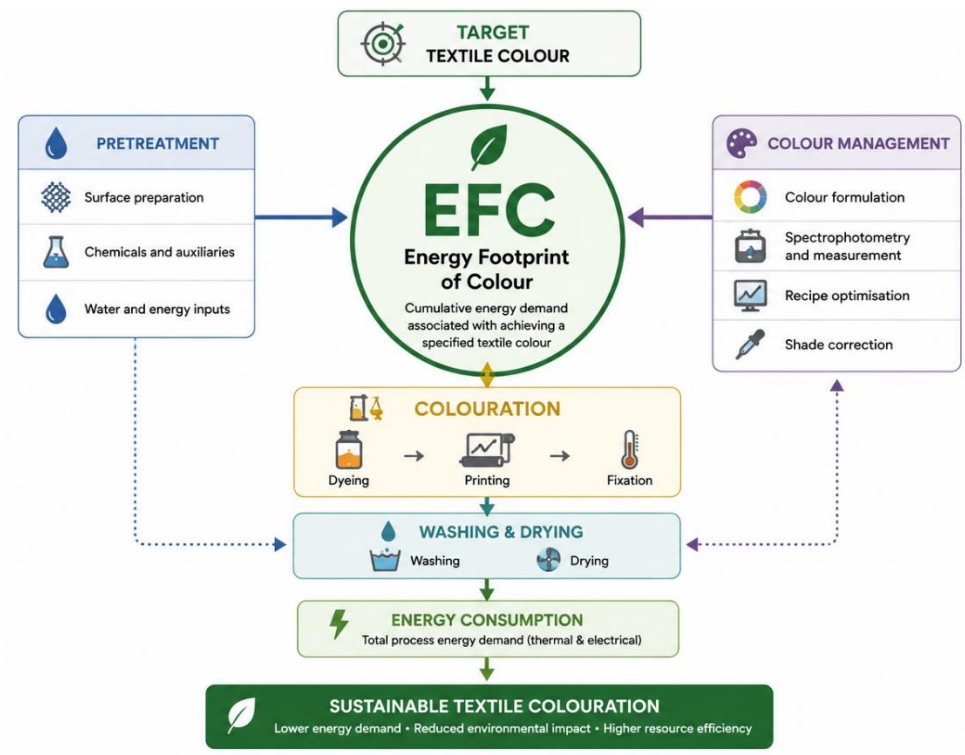


Figure 3. Proposed Energy Footprint of Colour (EFC) framework linking target colour with cumulative energy demand throughout textile processing.

4. Illustrative Case Study: Technological Effort Required to Achieve a Target Colour

To illustrate the proposed EFC concept, experimental data from a broader study on the influence of textile structure on colour reproduction were reconsidered from an energy-efficiency perspective. The original study investigated how differences in fabric construction and surface structure affect the reproduction of the same target colour when identical initial dye recipes are applied.

For the present analysis, five cotton samples with different structures were selected: four woven fabrics, one plain weave (1/1), two rib-weave fabrics and one twill (4/1), and one plain

single-jersey knitted fabric. Four nominal dye concentrations were investigated: 0.25, 0.75, 1.40 and 2.00% of dye relative to textile mass.

Although the same nominal dye concentration was initially applied, differences in textile structure resulted in different colour responses. The dye concentration therefore had to be adjusted individually for each textile structure to reproduce the required target colour within the accepted quality tolerance. Table 1 summarises these corrections.

Table 1. Dye-concentration adjustments required to reproduce the target colour on five different cotton textile structures.

Nominal dye concentration (% of textile mass)	Corrected concentration required for each textile structure (% of textile mass)	Mean corrected concentration (% of textile mass)	Mean absolute concentration correction (% of textile mass)	Relative concentration increase (%)
0.25	0.420; 0.590; 0.258; 0.291; 0.521	0.416	0.166	66.4
0.75	1.395; 1.430; 0.750; 1.350; 1.690	1.323	0.573	76.4
1.40	1.870; 2.090; 1.900; 1.870; 1.590	1.864	0.464	33.1
2.00	3.000; 3.540; 2.650; 2.890; 3.520	3.120	1.120	56.0

Each value in the second column corresponds to one of the five textile structures and represents the dye concentration required after recipe correction; the values are therefore not repeated measurements of the same sample. The results demonstrate that the adjustment required to reproduce the target colour varied considerably with textile structure and nominal dye concentration. For example, at the nominal concentration of 0.75%, the corrected concentrations ranged from 0.750 to 1.690%, with a mean value of 1.323%, corresponding to a mean increase of 76.4%. At the nominal concentration of 1.40%, the mean corrected concentration was 1.864%, corresponding to a considerably lower relative increase of 33.1%.

The table does not represent measured energy consumption and therefore cannot be used to calculate EFC directly. It demonstrates, however, that the same colour-reproduction objective may require substantially different degrees of recipe adjustment depending on the textile substrate. In industrial production, differences in dye concentration and the need for additional correction steps may affect material consumption, processing time and, depending on the required operations, thermal and electrical energy demand. The experimental results therefore illustrate the technological mechanism through which colour requirements may become relevant to EFC.

An additional consideration is whether every further improvement in colour matching is technologically justified. In industrial colouration, the objective is not to reduce colour difference indefinitely, but to reproduce the target colour within a predefined acceptance tolerance. Once this requirement has been reached, further correction may require additional technological effort while providing only a limited perceptual, functional or commercial benefit.

Within the proposed EFC framework, the decision to continue colour correction can therefore be expressed conceptually as

$$B_{\Delta E} > C_{EFC}$$

where $B_{\Delta E}$ represents the expected benefit of further reducing the colour difference from the target, while C_{EFC} represents the additional energy- and resource-related cost associated

with achieving that improvement. Additional correction is justified only when the expected benefit exceeds the additional technological and energy-related cost.
This expression is proposed as a conceptual decision rule rather than a numerical equation; the present study does not assign quantitative values or common units to $B_{\Delta E}$ and C_{EFC}.

Table 1 illustrates the relevance of this principle. Considerable recipe adjustments were required in some cases to achieve the target colour, but the magnitude of concentration correction alone does not determine whether the additional technological effort is justified. The relevant question is whether further improvement in colour matching provides sufficient quality benefit to justify the additional resources and energy required. Once the specified colour tolerance has been achieved, the EFC perspective favours avoiding further correction unless a meaningful improvement in product quality is obtained.
In simple terms: further correction is justified only when the benefit of a better colour match outweighs the additional energy and resources required to obtain it.

5. Conclusion

The Energy Footprint of Colour (EFC) is proposed as a conceptual framework linking a specified textile colour with the cumulative thermal and electrical energy required to achieve it. The reviewed studies demonstrate that this energy demand is determined jointly by colour requirements and the technological route, rather than by colour depth or dye concentration alone. The illustrative case study further shows that reproducing the same target colour on different textile structures may require substantially different recipe adjustments, demonstrating why colour achievement and technological effort should be considered together. Within the proposed framework, colour tolerance remains the required quality constraint, while energy demand becomes an additional criterion for selecting among technically acceptable production routes. Future research should quantify EFC under controlled and industrial conditions and determine how it can be integrated into colour-recipe optimisation and process-control systems.

6. References

[1] Liu, Senbiao. Intelligent techniques and optimization algorithms in textile colour management: a systematic review of applications and prediction accuracy // *Fashion and Textiles*, 11(2024), 13. (ISSN 2198-0802)
[2] European Commission. *The European Green Deal*. COM(2019) 640 final. Brussels : European Commission, 2019.
[3] European Commission. *A New Circular Economy Action Plan – For a Cleaner and More Competitive Europe*. COM(2020) 98 final. Brussels : European Commission, 2020.
[4] European Parliament; Council of the European Union. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality (European Climate Law). *Official Journal of the European Union*, L243, 9 July 2021.

[5] European Commission. *EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles*. COM(2022) 141 final. Brussels : European Commission, 2022.

[6] Ozer, Betul; Güven, Behcet. Energy efficiency analyses in a Turkish fabric dyeing factory // *Energy Source Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43 (2021), 7, 852–874. (ISSN 1556-7036), (https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1755392).

[7] Awual, Mrs Eti et al. 2024. Ligand imprinted composite adsorbent for effective Ni(II) ion monitoring and removal from contaminated water // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 131(2024), 585–592. (ISSN 1876-794X), (https://doi.org/10.1016/j. jiec.2023.10.062).

[8] Li, Shiqui; Shamey, Renzo; Xu, Changhai. (2009), Prediction of depth of shade of a dyed polyester fabric based on fibre fineness and fabric structure // *Coloration Technology*, 125(2009), 296-303. (ISSN 1478-4408), (https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2009.00210.x)

[9] Irshad, Farida et al. Development of prediction system for shade change variations in dyed cotton fabric after application of water repellent finishes // *Journal of Natural Fibers*, 20(2023), 1, (ISSN 1544-0478), (https://doi.org/10.1080/ 15440478.2022.2154302).

[10] Zhu, Di; Bao, Yunfei; Ding, Xuemei; Wu, Xiongying. Unveil the carbon footprint of textiles dyed with different reactive dyestuff recipes from an industrial manufacturing perspective // *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **29**(2024); 1598–1620. (ISSN 0948-3349) (DOI: 10.1007/s11367-024-02323-9)

[11] Chowdhury, Miraduzzaman et al. Optimizing textile dyeing and finishing for improved energy efficiency and sustainability in fleece knitted fabrics // *Cleaner Energy Systems*, 9 (2024) 100154 (ISSN 2772-7831) (https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100154)

[12] Parisi, Maria Laura; Fatarella, Enrico; Spinelli, Daniele; Pogni, Rebecca; Basosi, Riccardo. Environmental impact assessment of an eco-efficient production for coloured textiles // *Journal of Cleaner Production*, **108**(2015), Part A; 514–524. (DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.06.032); (ISSN 0959-6526)

[13] Rade, Arun Kudlip; Pharande, Philas A.; Saini, Daulat R. Effect of Change in Process Parameters on Energy Consumption during Textile Dyeing Process // *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 12(2017), 3; 579-588. (ISSN 0973-6085)

[14] Kim, Minsuk; Shim, Jae Yun; Lim, Seungju; Lee, Heedong; Kwon, Soon Chul; Hong, Seokil; Ryu, Sujin. Reduction of greenhouse gas emissions by optimizing the textile dyeing process using digital twin technology // *Fashion and Textiles*, **11**(2024), 17. (ISSN 2198-0802) (DOI: 10.1186/s40691-024-00384-w)

[15] Yılmaz, K.; Aksu, İ. Ö.; Göçken, M.; Demirdelen, T. Sustainable Textile Manufacturing with Revolutionizing Textile Dyeing: Deep Learning-Based, for Energy Efficiency and Environmental-Impact Reduction, Pioneering Green Practices for a Sustainable Future // *Sustainability*, **16**(2024), 8152. (ISSN 2071-1050) (DOI: 10.3390/su16188152)

Stručni pregledi za odlučivanje o mjerama obnove zgrada
Expert Inspection for Deciding on Building Renovation Measures

D. Vidaković[1,*], M. Hadzima-Nyarko[1], S. Lozančić[1], A. Jurić[1]

[1] Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J. J. Strossmayera, Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: dvidak@gfos.hr

Sažetak
Unaprjeđenje temeljnih zahtjeva na postojećim zgradama važno je zbog povećanja sigurnosti korisnika, ušteda energije i raznih drugih pozitivnih efekata s preventivnim i dugoročnim djelovanjem. Prvi korak k tom cilju su stručni pregledi kojima se utvrđuje stanje zgrade sa svim slabostima, jer se na temelju analize izvješća pregleda određuju potrebne i pogodne mjere za obnovu te njihov prioritet. U članku su objašnjeni sadržaj i procedura takvih pregleda te koje mjere može obuhvaćati obnova zgrada. Također, razmotrene su brojne dobrobiti koje obnova zgrada donosi, ali i različite prepreke koje je u praksi otežavaju, što sve treba uzeti u obzir kod višekriterijskog odlučivanja o poduzimanju mjera obnove i poticanja na veća ulaganja u unaprjeđenja.

Ključne riječi: zgrade, temeljni zahtjevi, propisi, stručni pregledi, mjere obnove

Abstract
Improving the basic requirements of existing buildings is important for increased user safety, energy savings, and various other positive effects with preventive and long-term effects. The first step toward this goal is expert inspections aimed at determining the condition of a building and identifying all its weaknesses, since the analysis of inspection reports serves as the basis for defining appropriate rehabilitation measures and establishing their priorities. This paper explains the content and procedure of such inspections, as well as the types of measures that building renovation may include. Also, the paper discusses numerous benefits provided by building renovation, along with the various obstacles that hinder its implementation in practice. All these factors should be taken into account in multicriteria decision-making regarding the implementation of renovation measures and the encouragement of greater investment in improvements.

Key words: buildings, basic requirements, regulations, expert inspections, renovation measures.

1. Uvod

Procjenjuje se da je u Europi 75 % stambenih i približno 25 % nestambenih zgrada starije više od 50 godina [1]. Očekuje se da će one ostati u upotrebi do 2050. godine, a najveći dio tih zgrada je energetski neučinkovit [2, 3]. U Hrvatskoj je, također, najviše zgrada izgrađeno u vrijeme dok su vrijedili stari zakoni i standardi, s nikakvim ili puno nižim zahtjevima za energetsku učinkovitost, otpornost na potrese i druge zahtjeve koje danas građene zgrade obvezno moraju ispunjavati. U kontinentalnoj Hrvatskoj oko 34 % višestambenih zgrada spada u zgrade s najlošijim svojstvima (D ili lošijeg energetskog razreda), a u primorskoj Hrvatskoj oko 30 % (C ili lošijeg energetskog razreda) [4]. U takvim su zgradama gubitci energije kroz ovojnice veliki, pa je to jedan od razloga što je oko 42 % od ukupne potrošnje energije u Hrvatskoj u zgradama [5].

Početkom 70-tih godina 20. stoljeća propisani su prvi standardi za toplinska svojstva ovojnica zgrada, a tek je Direktiva (EU) o energetskim svojstvima zgrada iz 2002. dala osnove za primjerene nacionalne propise. U Hrvatskoj Dugoročna strategija obnove nacionalnog fonda zgrada do 2050. godine ima svrhu podupiranja transformacije postojećih javnih i privatnih, stambenih i nestambenih zgrada u energetski visokoučinkovite i dekarbonizirane, a uz to i s većom razinom sigurnosti od potresa i požara. Potresna otpornost zgrada regulirana je Eurokodom 8 iz 2004. godine, ali njegove odredbe ne pokrivaju niz mogućih koncepata obnove zgrada. Ne postoje ni smjernice ni interdisciplinarni pristup koji bi uz potresnu otpornost paralelno razmatrao energetsku učinkovitost i kvalitetu unutarnjeg okruženja [1]. Žegarac Leskovar i Premrov (2019) kao primjere loše prakse ističu djelomičnu obnovu zgrada kod kojih se nikakva pažnja nije posvećivala kvaliteti unutarnjeg zraka (u mnogim je slučajevima čak nakon provedbe nekih mjera obnove došlo i do pogoršanja kvalitete zraka) ili je obnova bila fokusirana isključivo na optimalnu energetsku učinkovitost, a zanemarena je potresna otpornost zgrade.

Očuvanje postojećih resursa uređenjem, revitalizacijom i ponovnom uporabom zgrada u skladu je s načelima kružnog gospodarenja. Studija Popae i Gheorghea (2026) pokazala je da energetska obnova dovodi do srednjih vrijednosti CO_2 otiska 27 - 58 kg/m^2, a naknadno pojačanje za potresnu otpornost 23 - 121 kg/m^2. Ipak, sve te vrijednosti znatno su niže od specifičnog CO_2 otiska povezanog s rušenjem i novom gradnjom [6]. To pokazuje da je obnova postojećih zgrada održiva alternativa izgradnji novih zgrada [6, 7].

Stručni, specijalistički pregledi otkrivaju postojeće slabosti zgrada, daju uvid u to kojima je obnova najpotrebnija te identificiraju koje su mjere obnove najpogodnije. Tako se omogućuje definiranje liste prioriteta mjera i optimalne kombinacije za pojedine zgrade, kao i planiranje potrebnih programa za unaprjeđenje na državnoj ili regionalnoj razini (uključujući sufinanciranje i druge poticaje).

2. Mjere različitih razina obnove zgrada

Na procese poboljšanja zgrada odnosi se više različitih izraza i pojam obnova (engl. *renovation, rehabilitation*) zgrada nema strogo definirano, ujednačeno značenje [1]. Prema Zakonu o gradnji (2025), održavanje građevine je izvedba građevinskih i drugih radova na postojećoj građevini radi očuvanja temeljnih zahtjeva za građevinu tijekom njezina trajanja, kojima joj se ne mijenja usklađenost s lokacijskim uvjetima u skladu s kojima je izgrađena,

dok je rekonstrukcija izvedba građevinskih i drugih radova na postojećoj građevini kojima se utječe na ispunjavanje temeljnih zahtjeva za tu građevinu na način da se mijenja tehničko rješenje u skladu s kojima je izgrađena ili kojima se mijenja usklađenost s lokacijskim uvjetima u skladu s kojima je izgrađena [8]. Zakon o upravljanju i održavanju (2024) zahvat investicijskog održavanja koji po svojoj prirodi ili opsegu premašuje okvire redovitog održavanja nekretnine naziva poboljšicom. U graditeljstvu se obnova općenito smatra poboljšanjem ili modernizacijom stare, oštećene ili neispravne zgrade [1]. S njom se postiže bolje fizičko stanje i bolje uporabne mogućnosti, moguće čak i promjena namjene, a sve kako bi zgrada što dulje imala svojstva bitna za funkcionalnost i ekonomsku vrijednost.
Obnova bi trebala biti u što većoj mjeri usmjerena na dostizanje razine svojstava zgrada koja se zahtijevaju prilikom projektiranja i gradnje novih zgrada [9]. Djelomična obnova usmjerena je samo na poduzimanje mjera za poboljšanje pojedinih temeljnih zahtjeva, a sveobuhvatana obnova ima holistički pristup s energetskom, konstrukcijskom, funkcionalnom i arhitektonsko-dizajnerskom komponentom. Dakle, takva obnova u jednom projektu usklađeno rješava više problematičnih aspekata zgrade, što može obuhvaćati energetski učinkovite nadogradnje, strukturne popravke i pojačanja, modernizaciju električnih i vodovodnih sustava te estetska i druga poboljšanja.
U zemljama s visokom razinom potresnih aktivnosti, dugoročna učinkovitost programa energetske obnove dovodi se u pitanje, budući da snažan potres može ozbiljno utjecati na postojeće zgrade i ugroziti održivost provedenih radova. Zato su tamo razvijeni integrirani programi intervencija u kojima se mjere energetske obnove provode istovremeno s odgovarajućim jačanjem njihove potresne otpornosti [6]. Kod sveobuhvatne obnove zgrada javnog sektora u Hrvatskoj, uz povećanje potresne otpornosti, uvedena je obveza provedbe mjera zaštite od požara [10]**.**
Sve mjere koje Program energetske obnove višestambenih zgrada za razdoblje do 2030. godine predviđa kod različitih razina, odnosno kategorija obnove pokazuje slika 1.

Slika 1. Kategorije obnove zgrada prema obuhvatu mjera

Fokus obnove u pravilu je na zgradama u najlošijem stanju, a obzirom na to da je većina obiteljskih kuća i stanova u nižim energetskim razredima, mnogima je potrebna barem dubinska obnova [7]. Prema Zakonu o energetskoj učinkovitosti u zgradarstvu (2025) i Programu energetske obnove višestambenih zgrada za razdoblje do 2030. godine (2021), godišnja ušteda potrebne toplinske energije za grijanje postignuta integralnom obnovom treba biti najmanje 50 % u odnosu na stanje prije obnove, a dubinska obnova treba rezultirati uštedom potrebne toplinske energije za grijanje i primarne energije od najmanje 50 % u odnosu na stanje prije obnove. Starije, energetski lošije zgrade često imaju i loša konstrukcijska svojstva, pa taj program obnove do 2030. godine predviđa sufinanciranje šire od mjera energetske obnove [4]. Koncept dubinske obnove nije još definiran u pravu EU, ali prema Direktivi o energetskim svojstvima zgrada iz 2024. dubinsku obnovu trebalo bi u prvom koraku prihvatiti kao obnovu kojom se zgrade pretvaraju u zgrade gotovo nulte energije, a dugoročno u zgrade nulte energije. Obnova radi poboljšanja energetskih svojstava može biti izvrsna prilika za rješavanje kvalitete unutarnjeg okoliša, životnih uvjeta ranjivih kućanstava, za povećanje otpornosti na klimatske promjene i otpornost na rizike od katastrofa (npr. potresa i požara), uklanjanje opasnih tvari (npr. azbesta) i omogućavanje pristupačnosti za osobe s invaliditetom, pa tako prerasta u sveobuhvatnu obnovu. Takva obnova u jednom koraku može biti troškovno učinkovitija i uzrokovati manje emisija povezanih s obnovom nego postupna obnova [11].

Prema Zakonu o obnovi zgrada oštećenih nedavnim potresima u Hrvatskoj (2023), „cjelovita obnova zgrade podrazumijeva obnovu građevinske konstrukcije te izvođenje potrebnih pripremnih, građevinskih, završno-obrtničkih i instalaterskih radova odnosno radova kojima se zgrada dovodi u stanje potpune građevinske uporabljivosti do razine koju zahtijevaju pravila struke, a uz ostale potrebne radove, po potrebi, obuhvaća i popravak nekonstrukcijskih elemenata, popravak konstrukcije, pojačanje konstrukcije zgrade i/ili cjelovitu obnovu konstrukcije (u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije)“ [12]. Osim temeljnih zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti te gospodarenja energijom i očuvanjem topline, drugi temeljni zahtjevi se u cjelovitoj obnovi zgrada trebaju ispuniti ako je to moguće bez znatnijih zahvata na zgradi i bez znatnijeg povećanja troškova [12].

Radove koje mogu obuhvaćati različite vrste obnove detaljnije pokazuje tablica 1.

Tablica 1. Radovi na različito usmjerenim obnovama zgrada (prema [13, 14])

Enegetska obnova i osiguranje zdravih unutarnjih klimatskih uvjeta	- poboljšanje toplinskih svojstava ovojnice zgrade, uvođenje modernih sustava grijanja, hlađenja i ventilacije te integracija obnovljivih izvora energije i štedljiva rasvjeta
Konstrukcijska (protupotresna) obnova	- popravci i statičko pojačanje za povećanje sigurnosti i mehaničke otpornosti zgrade prema aktualnim propisima
Funkcionalna - arhitektonska modernizacija	- poboljšanje prostorne organizacije i funkcionalnosti prostora, dizajnersko unapređenje interijera i eksterijera, povećanje komfora boravka i kvalitete korištenja te rješavanje pristupačnosti (npr. rampama i dizalima)
Ostalo	- usklađivanje s važećim propisima i standardima (npr. za protupožarnu zaštitu), ugradnja elemenata zelene infrastrukture na zgradama i dr.

Zbog izraženog porasta sustava klimatizacije u EU, Direktiva o energetskim svojstvima zgrada (2024) ističe da bi prednost trebalo dati mjerama i strategijama koje poboljšavaju toplinska svojstva zgrada u ljetnom razdoblju, odnosno usredotočiti se na mjere za sprječavanje pregrijavanja [11].

3. Pregledi zgrada i popratna izvješća

Starije zgrade mogu imati probleme poput zastarjelih građevinskih materijala i opreme, dotrajalosti te potrebe za modernizacijom, dok novije zgrade mogu imati probleme povezane s lošom kvalitetom gradnje ili skrivenim nedostacima koji nisu uočeni tijekom gradnje [15].
Zakon o gradnji i Zakon o upravljanju i održavanju zgrada nalažu provođenje izvanrednih i redovitih pregleda zgrada koji se financiraju iz pričuve. Izvanredni pregledi obavljaju se bez odgode nakon izvanrednih događaja koji mogu utjecati na stabilnost zgrade, odnosno uvijek kada postoji sumnja na oštećenja (tada statičar provodi strukturni pregled). Redoviti pregledi obvezni su minimalno jednom godišnje radi provjere ispunjavanja temeljnih zahtjeva i procjene stanja zajedničkih dijelova zgrade (temelja, nosivih zidova, krovova, fasada, instalacija, liftova i dr.). Prema njihovim nalazima izrađuje se prijedlog godišnjeg i višegodišnjeg održavanja zajedničkih dijelova zgrade, što je temelj za preventivno upravljanje zgradom [16].
Stanje zgrade procjenjuje se nizom različitih parametara, a najopćenitiji su funkcionalnost, statička stabilnost i sigurnost, uz više kriterija povezanih s kvalitetom unutarnjeg okoliša [1].
U okviru pregleda kvalificirani stručnjaci različitih specijalnosti sustavno procjenjuju sve, od temelja do krova – nosive i druge elemente zgrade. Osim posebnih energetskih pregleda, na zgradama treba procijeniti, odnosno ispitati [1, 15, 17]:
- vanjske površine (prozore i vrata, žbuku, boju na fasadi i dr.),
- unutarnje stanje (vlagu i plijesni, pukotine, ishabanost, neravnine, stabilnost pojedinih elemenata zgrade i dr.),
- konstrukcijske elemente (temelje, zidove, stupove, grede, krovnu konstrukciju i dr.) – već pregledi vanjskih i unutarnjih površina mogu ukazivati na ozbiljne probleme nekih konstrukcijskih elemenata,
- izolacije,
- vodovodni sustav i sustav odvodnje te električne instalacije, sustave grijanja, hlađenja i ventilacije i druge elemente čiji je pregled obvezan (npr. dizala) i
- usklađenost sa sigurnosnim standardima (npr. sustav zaštite od požara) te eventualno postojanje materijala za koje se danas zna da su opasni ili nastanjenost nekim štetočinama.

Kvalitetno provedenim stručnim pregledima dolazi se do informacija bitnih za upravljanje rizicima, ali i za procjenu vrijednosti zgrade. Cilj je pregledima identificirati skrivene nedostatake, sigurnosne probleme i probleme za održavanje te onda ih odgovarajućim mjerama otkloniti ili ublažiti prije nego što dovedu do nesreća i/ili materijalne štete [17, 18].
Treba imati u vidu da se stanje zgrada mijenja tijekom vremena zbog raznih utjecaja. Tako se npr. tlo ispod zgrade može pomaknuti ili slegnuti, što onda dovodi do neravnomjernog slijeganja temelja, dok dugotrajna izloženost vlazi može uzrokovati rast plijesni i gljivica koje utječu na kvalitetu zraka i s tim na zdravlje korisnika [15].

Izvješća o pregledima zgrada su dokumenti koji detaljno opisuju stanje sustava i konstrukcijskih i drugih elemenata zgrade [17]. Ona daju detaljnu procjenu integriteta, sigurnosti i općeg stanja zgrade, što su važne informacije za različite dionike u fazi uporabe zgrada [17]. Kupci se oslanjaju na ta izvješća kako bi donijeli informirane odluke o kupnji, vlasnici ih koriste za rješavanje problema prije oglašavanja ili za potkrepljivanje traženih cijena, vlasnici i upravitelji zgrada za planiranje održavanja i mjera unaprjeđivanja te definiranje potrebnog proračuna, osiguravajuća društva za procjenu rizika, zajmodavci ih često zahtijevaju prije odobrenja financiranja, a regulatorna tijela ih trebaju za provjeru usklađenosti.

Izvješća o pregledima trebaju biti dokumentirana na odgovarajući način te obuhvaćati sve bitne podatke o zgradi, kao što su starost zgrade i konstrukcijski sustav i ugrađeni materijali [15]. Na kraju izvješća trebaju biti stručni zaključci i preporuke. Oni mogu uključivati smjernice o radnjama koje treba poduzeti obzirom na nalaz pregleda, odnosno preporuke za hitne popravke ili opće savjete za održavanje, kao i prijedloge za daljnju procjenu od strane odgovarajućih stručnjaka.

Kao predložak za preglede mogu se koristiti već defnirane, dobro formatirane kontrolne liste (kao obrasci), koje pojednostavljaju preglede i tako omogućuju stručnjacima da se usredotoče na utvrđivanje stanja umjesto da razmišljaju što sve treba provjeriti i evidentirati. Uz to, one doprinose standardiziranju izvještavanja (tijekom više pregleda) i identificiranju učestalih problema te s tim olakšavaju praćenje trendova i usporedbu podataka tijekom vremena i između više zgrada. Kontrolne liste mogu biti i uže usmjerene (npr. samo za održavanje zgrada ili konstrukcijski pregled), a mogu se prilagoditi tako da uključuju građevinske propise. Bilježenje nalaza pregleda olakšavaju razni računalni programi, od onih najjednostavnijih u *Microsoft Excelu* do posebnih aplikacija s pohranom podataka u oblaku [17].

4. Kriteriji za odlučivanje o poduzimanju mjera obnove

Vlasnici zgrada dužni su ih održavati, no propisi ih ne obvezuju na unaprjeđivanje temeljnih zahtjeva zgrade u odnosu na one koji su bili na snazi u vrijeme dobivanja dozvole za gradnju, osim u slučajevima određene rekonstrukcije (u skladu s Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama iz 2015. god.), odnosno značajne obnove zgrade (prema Direktivi EU o energetskim svojstvima zgrada iz 2024. god.).

Slabosti povezane s neprikladnom funkcionalnošću zgrade te s raznim ekonomskim ili društvenim problemima mogu potaknuti obnovu zgrada, a veliki utjecaj na to ima sufinanciranje određenih mjera obnove od strane države, odnosno iz EU fondova. Tradicionalna analiza troškova i koristi često pokazuje da je isplativije rušiti i graditi novo, ali takav prevladavajući, linearni model gradnje i korištenja zgrada ima loš utjecaj na okoliš i dugoročno je neodrživ. Jedan od uobičajenih problema povezanih s evaluacijom mjera obnove je taj što se uvažavaju samo ekonomski kriteriji vlasnika, a zanemaruju druge relevantne koristi. Tada se značajno podcjenjuje puna vrijednost poboljšanja i ponovne upotrebe zgrada na nekoliko razina gospodarstva [19]. Za državu nije zanemariv pozitivan utjecaj građevinske i proizvodne aktivnosti te zapošljavanje na mjerama obnove, kao ni

povećanje korištenja obnovljivih izvora energije i smanjenje uvoza energije, smanjenje rizika od zdravstvenih problema i siromaštva te veća otpornost na prirodne katastrofe [4, 20].
Kod odlučivanja o mjerama obnove treba sagledati sve moguće dobrobiti koje to donosi. Koristi koje mogu donijeti provedene mjere obnove zgrada pokazuje slika 2.

Slika 2. Moguće ekonomske, društvene i ekološke koristi od različitih mjera obnove

S druge strane, treba imati u vidu i sve ono što vlasnicima nerijetko otežava ili potpuno onemogućava izvođenje mjera obnove. Baseer i dr. (2024) su na temelju pregleda literature identificirali i analizirali prepreke obnove i pri tome su ih podijelili na glavne grupe kako pokazuje tablica 2.

Tablica 2. Prepreke za obnovu zgrada koje se javljaju u praksi (prema [3, 7, 14, 20])

Financijske – kao što su veliki početni investicijski trošak, nedostatak sufinanciranja i druge državne potpore, nemogućnost povoljnog kreditiranja, predugi i neizvjesni rok povrata ulaganja i subjekt koji snosi troškove obnove nije onaj koji uživa njene dobrobiti.	**Tehničke** – kao što su nedostatak kvalificiranih stručnjaka, teškoće u definiranju optimalnih mjera obnove zbog različitosti zgrada, nedostatak odgovarajućih standarda i smjernica, složeni radovi koji zahtjevaju angažiranje više izvođača i smanjenje korisne površine zgrade.
Institucionalne – kao što su različiti interesi javnih i privatnih dionika, teškoće u usklađivanju provedbe projekta obnove s postupcima svih uključenih izvora financiranja i nedostatak baza podataka o pregledima postojećih zgrada.	**Društvene** – kao što su prekid i remećenje korištenja zgrade, nesklonost promjenama, nedostatak informacija koje motiviraju za obnovu, slabo povjerenje u koristi od obnove i ograničena svijest i konzervativni stavovi o nužnosti obnove.

Financijske prepreke najčešće su jedne od najvažnijih [7], a kod proračuna isplativosti postoji neizvjesnost vanjskih utjecaja u predstojećem, višedesetljetnom vijeku uporabe zgrade, kao što su npr. promjene klime i promjene na tržištu nekretnina i energije.

5. Zaključak

Uz redovito održavanje, unaprjeđenja stanja ključna su za osiguranje kvalitete života i sigurnosti korisnika te vrijednost zgrade, jer ne samo da sprječavaju skupe popravke u budućnosti, već i poboljšavaju cjelokupno iskustvo stanovanja ili druge uporabe. Dobro osmišljena obnova zgrada jedna je od najvažnijih stavki upravljanja zgradama, posebno kod starijih zgrada koje ne zadovoljavaju sadašnje standarde. No, jedinstvene karakteristike svake pojedine zgrade zahtijevaju različite mjere obnove.
Odlučivanje o poduzimanju mjera obnova temelji se na nalazima stručnih pregleda. Temeljiti pregledi ne iziskuju velika ulaganja, a otkrivanjem nedostataka zgrada i određivanjem

optimalnih i pravovremenih mjera obnove mogu se znatno smanjiti rizici od negativnih događaja te postići dugoročno isplative uštede na troškovima uporabe i održavanja, kao i neke druge dobrobiti. U načelu, cilj je probleme zgrada uočiti dok ne postanu preopasni i preskupi za rješavanje.

Kod odlučivanja o projektu obnove (mjerama obnove koje će se i kada poduzeti) treba primijeniti višekriterijsku analizu koja uzima u obzir sve bitne pozitivno i negativno djelujuće čimbenike, specifične za određenu zgradu. Što je obnova složenija, iziskuje bolje planiranje za usklađivanje izvedbe više potrebnih građevinskih i drugih radova. Za sve to potrebne su relevantne baze podataka o zgradama i angažiranje multidisciplinarnog tima stručnjaka.

Zahvala: Ovaj rad rezultat je aktivnosti u okviru istraživačkog projekta: 581-UNIOS-74 „Integrirani pristup održivoj obnovi graditeljskog nasljeđa Slavonije i Baranje“ (IPOO) financiranog iz izvora 581 Mehanizam za oporavak i otpornost (NPOO).

6. Literatura

[1] Žegarec Leskovar, Vesna; Premrov, Miroslav. Integrative Approach to Comprehensive Building Renovations. Cham: Springer, 2019. (ISBN 978-3-030-11476-3)

[2] Artola, Irati; Rademaekers, Koen; Williams, Rob; Yearwood, Jessica. Boosting Building Renovation: What potential and value for Europe? European Parliament, 2016. (ISBN 978-92-846-0308-4)

[3] Bagaini, Annamaria; Colelli, Francesco; Croci, Edoardo; Molteni, Tania. Assessing the relevance of barriers to energy efficiency implementation in the building and transport sectors in eight European countries // *The Electricity Journal*, 33(2020), 106820; 1-8. (ISSN 1873-6874)

[4] Program energetske obnove višestambenih zgrada za razdoblje do 2030. godine. Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine, 2021.

[5] Nacionalni portal energetske učinkovitosti. Ušteda energije u građevinama, 2026. https://www.enu.hr/gradani/info-edu/usteda-energije-u-zgradama/ (Pristup 16.04.2026.)

[6] Popa, Viarel; Gheorghe, Bogdan**.** Sustainability of Building Stock Rehabilitation: CO2e Footprint of Energy Renovation and Seismic Strengthening, a Case Study // *Sustainability*, 18(2026), 3735; 1-23. (ISSN *2071-1050*)

[7] Basser, Majid; Ghiaus, Christian; Kachalla, Ibrahim Ali. An Overview of Barriers and Potential Solutions for Energy Renovation of Existing Buildings // *Journal of Electrical Systems*, 20(2024), 11s; 53-58. (ISSN 1112-5209)

[8] Zakon o gradnji // *Narodne novine*, 155(2025), (ISSN 1333-9273)

[9] Program razvoja kružnog gospodarenja prostorom i zgradama za razdoblje 2021. do 2030. godine. Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine RH, 2021.

[10] Započele prijave na Poziv za energetsku obnovu zgrada javnog sektora vrijedan 106 milijuna eura. Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine RH, 2026, https://mpgi.gov.hr/vijesti-8/zapocele-prijave-na-poziv-za-energetsku-obnovu-zgrada-javnog-sektora-vrijedan-106-milijuna-eura/19623 (Pristup 18.04.2026.)

[11] Direktiva (EU) 2024/1275 o energetskim svojstvima zgrada, Europski parlament i Vijeće, 2023.

[12] Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-Zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-Mislavačke županije i Karlovačke županije // *Narodne novine*, 21(2023), (ISSN 1333-9273)

[13] Križ Šelendić, Irena. Na valu obnove, https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/7.dijalog_Na_valu_obnove.pdf (Pristup 16.04.2026)

[14] Buterin-Kranjec, Maja. Seismic-Resilient and Energy- Efficient Buildings: Croatia's Model of Comprehensive Renovation, https://ceu.ijs.si/wp-content/uploads/2025/11/Forum-V8_05_ButerinKranjec_Seismic-Resilient-and-Energy-Efficient-Buildings-Croatias-Model-of-Comprehensive-Renovation.pdf (Pristup 23.04.2026.)

[15] Cyond. Building inspection, https://cyond.com/comprehensive-building-inspection-report/ (Pristup 18.04.2026)

[16] Zakon o upravljanju i održavanju zgrada // *Narodne noovine*, 152(2024)

[17] GoAudits. How to Write an Effective Building Inspection Report, https://goaudits.com/blog/building-inspection-report/

[18] Resicert. Navigating Building Inspections: A Comprehensive Guide, 2024, https://resicert.com.au/navigating-building-inspections-comprehensive-guide-resicert/ (Pristup 23.04.2026.)

[19] Ürge-Vorsatz, Diana; Novikova, Aleksandra; Sharmina, Maria. Counting good: quantifying the co-benefits of improved efficiency in buildings / European Council for an Energy Efficient Economy, 2009, 185-195. https://research.ceu.edu/en/publications/counting-good-quantifying-the-co-benefits-of-improved-efficiency-/ (Pristup 20.04.2026)

[20] de Almeida, Manuela; Ferreira, Marco; Rodrigues, Ana. Co-benefits of energy related building renovation - Demonstration of their impact on the assessment of energy related building renovation (Annex 56), International Energy Agency, 2017.

Hidraulička funkcija vodosprema u suvremenim vodoopskrbnim mrežama
Hydraulic Function of Water Storage Reservoirs in Modern Water Supply Networks

M. Šperac[1,*], M. Ilišević[1]

[1]Građevinski i arhitektonski fakultet, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: msperac@gfos.hr

Sažetak
Vodospreme predstavljaju jedan od najvažnijih elemenata suvremenih vodoopskrbnih sustava jer omogućuju sigurnu, pouzdanu i energetski učinkovitu opskrbu stanovništva vodom. Njihova osnovna hidraulička funkcija je izravnavanje razlika između promjenjive potrošnje i relativno konstantnog dotoka vode, čime se osigurava stabilan rad sustava te smanjuje opasnost od predimenzioniranja crpnih stanica i transportnih cjevovoda. Osim skladištenja vode, vodospreme imaju važnu ulogu u regulaciji tlakova, ublažavanju hidrauličkih udara, omogućavanju gravitacijske distribucije te osiguravanju operativnih, protupožarnih i sigurnosnih rezervi vode. U radu su prikazane osnovne značajke i podjela vodosprema, njihova hidraulička funkcija, uloga u sigurnosti i pouzdanosti vodoopskrbnih sustava te primjena u suvremenim „pametnim“ vodoopskrbnim mrežama. Posebna je pozornost posvećena digitalizaciji upravljanja, primjeni SCADA sustava i hidrauličkih modela u optimizaciji rada vodosprema. Također su razmotreni najvažniji izazovi projektiranja i eksploatacije, uključujući optimalno dimenzioniranje spremnika i očuvanje kvalitete vode tijekom skladištenja. Zaključeno je da pravilno projektirane i učinkovito upravljane vodospreme predstavljaju ključan preduvjet za siguran, održiv i ekonomski učinkovit rad suvremenih vodoopskrbnih sustava.

Ključne riječi: vodosprema, vodoopskrbni sustav, hidraulička funkcija, regulacija tlakova, pametne vodoopskrbne mreže

Abstract
Water storage reservoirs are among the most important components of modern water supply systems, ensuring reliable, safe, and energy-efficient water distribution. Their basic hydraulic function is to equalize the differences between variable consumption and relatively constant water inflow, which ensures stable operation of the system and reduces the risk of oversizing pumping stations and transport pipelines. In addition to water storage, reservoirs play a significant role in pressure regulation, mitigation of hydraulic transients, gravity-fed water distribution, and the provision of operational, fire-fighting, and emergency water reserves. This paper presents the main characteristics and classification of water reservoirs,

their hydraulic functions, their contribution to the safety and reliability of water supply systems, and their role in modern smart water networks. Particular attention is given to digital system management through SCADA systems and hydraulic modelling used for optimizing reservoir operation. The paper also discusses the main design and operational challenges, including optimal reservoir sizing and maintaining water quality during storage. It is concluded that properly designed and efficiently managed water reservoirs are essential for ensuring the safe, sustainable, and cost-effective operation of modern water supply systems.

Key words: water reservoir, water supply system, hydraulic function, pressure regulation, smart water networks

1. Uvod

Vodoopskrbni sustavi predstavljaju složene infrastrukturne cjeline čija je osnovna zadaća osigurati kontinuiranu i zdravstveno ispravnu opskrbu potrošača vodom uz odgovarajuće tlakove i potrebne količine. Suvremene vodoopskrbne mreže karakteriziraju promjenjivi obrasci potrošnje, sve veći zahtjevi za energetskom učinkovitošću te potreba za smanjenjem gubitaka vode, zbog čega upravljanje hidrauličkim režimima postaje jedan od ključnih aspekata njihova projektiranja i eksploatacije [1]. U takvim sustavima vodospreme imaju višestruku funkciju te predstavljaju jedan od najvažnijih elemenata za osiguravanje pouzdanosti i stabilnosti rada mreže.

S hidrauličkog gledišta, vodospreme imaju značajnu ulogu u regulaciji tlakova unutar mreže. Njihova elevacija određuje raspoloživu piezometarsku visinu te izravno utječe na raspodjelu tlakova i protoka u sustavu. Održavanjem stabilnih tlakova smanjuje se pojava hidrauličkih udara, povećava pouzdanost opskrbe te se smanjuju gubici vode uzrokovani curenjem iz cjevovoda [2]. Brojna istraživanja pokazuju da učinkovito upravljanje tlakovima predstavlja jednu od najvažnijih mjera za smanjenje gubitaka vode i poboljšanje energetske učinkovitosti vodoopskrbnih sustava [3].

Razvoj naprednih sustava nadzora i upravljanja, poput SCADA sustava, hidrauličkih modela i modelno prediktivnog upravljanja, dodatno je naglasio važnost vodosprema kao aktivnih elemenata upravljanja mrežom. Suvremeni pristupi optimizaciji rada vodoopskrbnih sustava koriste razine vode u vodosprema kao ključne varijable za regulaciju tlakova, optimizaciju rada crpki i smanjenje troškova energije. Takvi pristupi omogućuju prilagodbu rada sustava promjenjivim uvjetima potrošnje te povećavaju otpornost mreže na poremećaje i izvanredne događaje.

Osim operativnih prednosti, vodospreme značajno doprinose pouzdanosti i sigurnosti vodoopskrbnih mreža. Njihova prisutnost povećava hidrauličku fleksibilnost sustava te omogućuje održavanje prihvatljive razine usluge čak i u slučaju djelomičnih kvarova ili iznenadnih promjena potražnje. Zbog toga se u suvremenom projektiranju sve veća pozornost posvećuje optimalnom određivanju volumena, položaja i načina upravljanja vodosprema unutar distribucijskih mreža [4].

U kontekstu održivog razvoja i rastućih zahtjeva za racionalnim gospodarenjem vodnim resursima, vodospreme imaju važnu ulogu i u smanjenju energetskih potreba sustava te povećanju njegove otpornosti na klimatske i operativne izazove. Integracija vodosprema s naprednim metodama upravljanja omogućuje postizanje veće učinkovitosti rada i smanjenje operativnih troškova [5].

2. Osnovne značajke vodosprema u vodoopskrbnim sustavima

Vodospreme predstavljaju jedan od temeljnih objekata svakog vodoopskrbnog sustava. Njihova uloga nije ograničena samo na skladištenje vode, već obuhvaća niz funkcija koje doprinose sigurnom, pouzdanom i ekonomičnom radu sustava. Pravilno projektirana i smještena vodosprema omogućuje uravnoteženje razlika između proizvodnje i potrošnje vode, osigurava potrebne zalihe za izvanredne situacije te doprinosi održavanju stabilnih hidrauličkih uvjeta u distribucijskoj mreži.

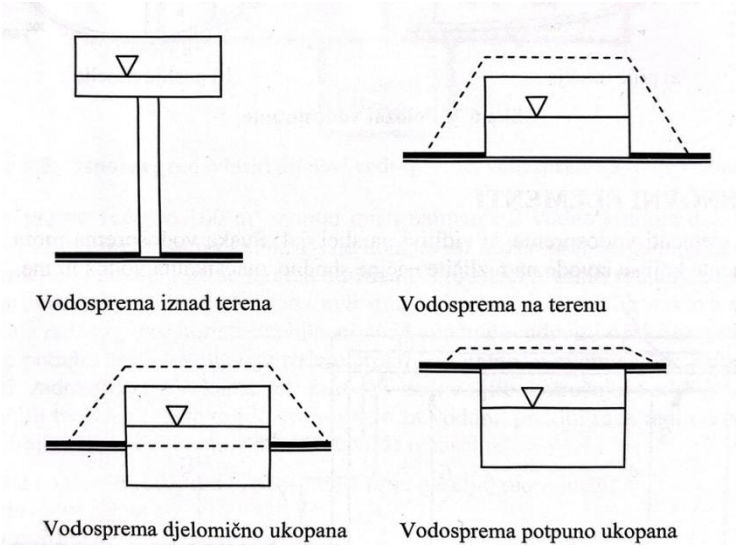
2.1. Definicija i namjena vodosprema

Vodosprema je građevina namijenjena privremenom skladištenju vode radi uravnoteženja razlika između količine vode koja se dovodi u sustav i količine koju korisnici troše tijekom različitih razdoblja dana. Osnovna namjena vodosprema jest osigurati kontinuiranu opskrbu potrošača vodom odgovarajuće kvalitete i pod potrebnim tlakom, neovisno o trenutačnim promjenama potrošnje. Osim funkcije izravnanja dnevnih oscilacija potrošnje, vodospreme služe i kao sigurnosna rezerva u slučaju kvarova na izvorištima, crpnim stanicama ili transportnim cjevovodima. Također osiguravaju potrebne količine vode za gašenje požara te omogućuju stabilniji i ekonomičniji rad crpnih postrojenja. Zbog svoje sposobnosti regulacije protoka i tlakova smatraju se ključnim elementom suvremenih vodoopskrbnih sustava.

2.2. Podjela vodosprema

Vodospreme se mogu klasificirati prema različitim kriterijima, pri čemu su najčešće podjele prema položaju i prema funkciji.

Prema načinu izvedbe razlikuju se nadzemne, poluukopane, ukopane vodospreme i vodotornjevi. Nadzemne vodospreme grade se na površini terena te se najčešće primjenjuju na lokacijama s povoljnim topografskim uvjetima. Poluukopane i ukopane vodospreme djelomično su ili potpuno smještene ispod površine tla, čime se postiže bolja zaštita vode od temperaturnih utjecaja i vanjskih onečišćenja. Vodotornjevi predstavljaju posebnu vrstu vodosprema kod kojih je spremnik smješten na povišenoj konstrukciji, čime se ostvaruje potrebna piezometarska visina za distribuciju vode gravitacijskim putem [6].



Slika1. Vrste vodosprema prema načinu izvedbe [7]

2.3. Položaj vodosprema u sustavu

Položaj vodospreme jedan je od najvažnijih čimbenika koji utječu na hidrauličku učinkovitost i ekonomičnost rada vodoopskrbnog sustava. Optimalno pozicioniranje određuje se analizom konfiguracije terena, rasporeda potrošača, potrebnih tlakova u mreži te zahtjeva vezanih uz sigurnost opskrbe. U pravilu se vodospreme smještaju na dominantne kote terena kako bi se omogućila gravitacijska distribucija vode i smanjila potreba za radom crpki. Takav pristup rezultira nižom potrošnjom energije i većom pouzdanošću sustava. Istodobno, položaj spremnika mora omogućiti ravnomjernu raspodjelu tlakova u mreži te osigurati dovoljnu količinu vode za sve korisnike, uključujući i najudaljenije dijelove sustava. Pravilnim odabirom lokacije moguće je povećati sigurnost opskrbe, smanjiti gubitke vode i poboljšati ukupnu učinkovitost rada vodoopskrbne mreže.

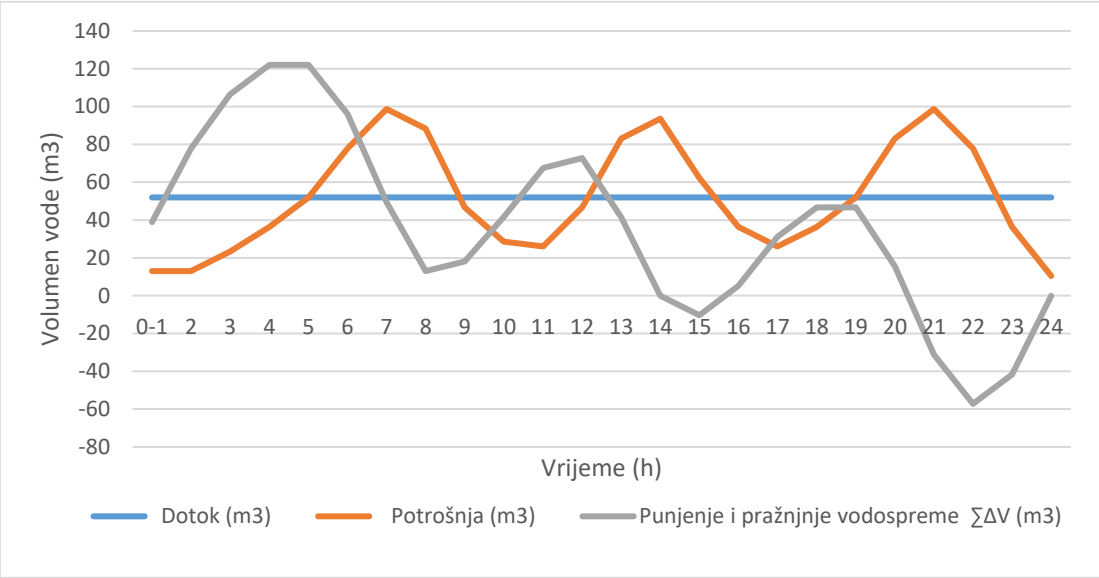
3. Hidraulička funkcija vodosprema

Vodospreme predstavljaju jedan od najvažnijih elemenata suvremenih vodoopskrbnih sustava jer svojim hidrauličkim djelovanjem omogućuju stabilan, siguran i energetski učinkovit rad mreže. Njihova osnovna zadaća nije samo skladištenje vode, već i regulacija protoka i tlakova unutar sustava, osiguravanje rezervi za izvanredne situacije te povećanje ukupne pouzdanosti vodoopskrbe. U suvremenim distribucijskim mrežama vodospreme imaju ključnu ulogu u prilagodbi sustava promjenjivim uvjetima potrošnje i rada, čime doprinose racionalnijem korištenju infrastrukturnih kapaciteta.

3.1. Izravnavanje dnevne neravnomjernosti potrošnje

Potrošnja vode tijekom dana nije konstantna, već se značajno mijenja ovisno o navikama korisnika i vrsti potrošača. Najveća potrošnja obično se javlja u jutarnjim satima i večernjim razdobljima, dok je tijekom noći potrošnja minimalna. Takve promjene zahtijevaju elemente sustava koji mogu kompenzirati razlike između dotoka i trenutačne potražnje za vodom. Kako bi se zadovoljile potrebe korisnika tijekom razdoblja povećane potrošnje, nije

ekonomski opravdano projektirati izvorišta, crpne stanice i transportne cjevovode za maksimalna vršna opterećenja. Umjesto toga, vodospreme služe za privremeno akumuliranje viškova vode tijekom razdoblja smanjene potrošnje te za njihovo korištenje tijekom vršnih opterećenja. Na taj način omogućuje se ravnomjerniji rad crpnih postrojenja, smanjuje instalirana snaga crpki te optimizira iskorištenost postojećih infrastrukturnih kapaciteta.Tijekom noćnih sati, kada je potrošnja manja od dotoka u sustav, razina vode u vodosprema raste i spremnik se puni. Tijekom vršnih razdoblja dolazi do pražnjenja spremnika te se potrebna količina vode nadoknađuje iz akumuliranog volumena. Takav način rada omogućuje učinkovito izjednačavanje dnevnih oscilacija potrošnje i osigurava kontinuiranu opskrbu svih korisnika.
Vodosprema izravnava razliku između stalnog dotoka i promjenjive potrošnje vode tijekom 24 sata(slika 2.). Kada je dotok > potrošnja, vodosprema se puni , kada je dotok < potrošnja, vodosprema se prazni.



Slika 2. Primjer dnevne neravnomjernosti potrošnje i uloge vodospreme u izravnavanju dotoka i potrošnje

3.2. Regulacija tlakova u mreži

Jedna od najvažnijih hidrauličkih funkcija vodosprema odnosi se na regulaciju tlakova unutar vodoopskrbne mreže. Tlak u sustavu izravno je povezan s visinom vodnog lica u vodosprema, odnosno s piezometarskom razinom koju spremnik održava. Zbog toga položaj i elevacija vodospreme imaju presudan utjecaj na hidrauličke uvjete rada mreže.
U sustavima bez odgovarajuće regulacije tlakova mogu se pojaviti značajne oscilacije koje negativno utječu na pouzdanost opskrbe. Previsoki tlakovi povećavaju opterećenje na cjevovode, armature i priključke te mogu uzrokovati povećane gubitke vode kroz postojeća curenja. S druge strane, preniski tlakovi mogu dovesti do problema u opskrbi viših dijelova naselja i udaljenih korisnika.Vodospreme omogućuju održavanje relativno stabilne

piezometarske razine tijekom promjena potrošnje. Zahvaljujući tome smanjuju se oscilacije tlakova u mreži te se postiže ravnomjernija raspodjela vode među potrošačima. Stabilniji tlakovi doprinose sigurnijem radu sustava, smanjuju rizik od puknuća cjevovoda i produžuju vijek trajanja infrastrukture. Posebna važnost regulacije tlakova dolazi do izražaja u velikim i razgranatim mrežama s izraženim visinskim razlikama. U takvim slučajevima pravilno smještene vodospreme omogućuju održavanje potrebnih tlakova u različitim zonama sustava bez potrebe za složenim i energetski zahtjevnim rješenjima.

3.3. Ublažavanje hidrauličkih udara

Zbog svoje sposobnosti privremenog prihvata ili otpuštanja vode, vodospreme imaju značajnu ulogu u ublažavanju posljedica hidrauličkih udara. One djeluju kao hidraulički amortizeri koji apsorbiraju dio energije nastale promjenom režima strujanja. Na taj način smanjuje se amplituda tlačnih valova koji se šire sustavom. Prisutnost vodospreme u mreži doprinosi disipaciji viška energije i smanjenju dinamičkih opterećenja kojima su izloženi cjevovodi i oprema. Time se povećava sigurnost rada sustava te smanjuje vjerojatnost pojave kvarova i prekida opskrbe. U složenijim sustavima vodospreme se često koriste zajedno s drugim zaštitnim elementima kako bi se postigla što učinkovitija zaštita od hidrauličkih udara.

3.4. Osiguranje gravitacijske distribucije

Jedna od najvećih prednosti vodosprema jest mogućnost ostvarivanja gravitacijske distribucije vode. Kada se spremnik nalazi na odgovarajućoj nadmorskoj visini, potencijalna energija akumulirane vode može se koristiti za opskrbu velikog dijela mreže bez potrebe za dodatnim prepumpavanjem.

Gravitacijski sustavi smatraju se najpovoljnijim rješenjem s energetskog i operativnog aspekta. Budući da se transport vode odvija djelovanjem gravitacije, smanjuje se potreba za radom crpnih stanica, što rezultira manjom potrošnjom električne energije i nižim troškovima održavanja. Istodobno se povećava pouzdanost sustava jer opskrba može biti osigurana i tijekom kraćih prekida napajanja električnom energijom.

Pravilno smještena vodosprema omogućuje održavanje potrebnih tlakova u distribucijskoj mreži bez dodatnih energetskih ulaganja. Time se postiže veća energetska učinkovitost sustava te smanjuju emisije stakleničkih plinova povezane s proizvodnjom električne energije. U kontekstu suvremenih zahtjeva za održivim razvojem i smanjenjem potrošnje energije, gravitacijska distribucija predstavlja jedno od najvažnijih načela projektiranja vodoopskrbnih sustava.

Osim ekonomskih i energetskih prednosti, gravitacijska opskrba povećava otpornost sustava na izvanredne događaje te omogućuje stabilniju i sigurniju distribuciju vode korisnicima. Zbog toga se pri planiranju novih vodoopskrbnih sustava posebna pozornost posvećuje odabiru optimalne lokacije i visinskog položaja vodosprema kako bi se maksimalno iskoristile prednosti gravitacijskog rada.

4. Uloga vodosprema u sigurnosti i pouzdanosti vodoopskrbnog sustava

Uloga vodospreme je osiguranje operativne, protupožarne i sigurnosne rezerve vode. Jedna od najvažnijih zadaća vodosprema je osiguravanje dovoljne količine vode tijekom vršnih

opterećenja. U jutarnjim i večernjim satima potrošnja vode značajno raste zbog povećanih potreba kućanstava, industrije i javnih ustanova. U tim trenucima vodosprema preuzima ulogu dodatnog izvora vode te nadoknađuje razliku između trenutne potrošnje i kapaciteta crpnih stanica ili uređaja za pripremu vode. Na taj način sprječava se pad tlaka u mreži i osigurava nesmetana opskrba svih korisnika. Osim izravnavanja dnevnih oscilacija potrošnje, vodospreme značajno povećavaju sigurnost vodoopskrbnog sustava u izvanrednim situacijama. U slučaju kvara crpki, prekida opskrbe električnom energijom, oštećenja cjevovoda ili drugih tehničkih problema, akumulirana voda omogućuje nastavak opskrbe tijekom određenog vremenskog razdoblja. Time se smanjuje rizik od prekida vodoopskrbe i omogućuje dovoljno vremena za sanaciju nastalog problema.Posebno važna funkcija vodosprema odnosi se na protupožarnu zaštitu. Tijekom gašenja požara potrebne su velike količine vode u kratkom vremenu, što često premašuje uobičajenu potrošnju sustava. Zbog toga se dio volumena vodospreme predviđa kao protupožarna pričuva koja mora biti dostupna u svakom trenutku.
Stoga se potreban volumen vodospreme računa po formuli:

$$V_{UK} = V_O + V_P + V_S$$

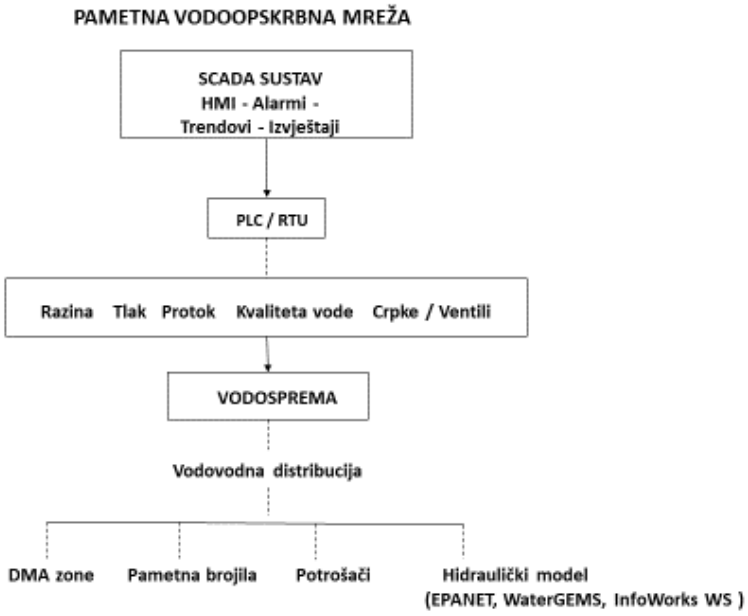
Gdje je :
V_{UK} – ukupni vulumen vodospreme
V_O – volumen operativne rezerve
V_P – volumen protupožarne rezerve
V_S – volumen sigurnosne rezerve

5. Vodospreme u suvremenim „pametnim“ vodoopskrbnim mrežama

Razvoj informacijskih i komunikacijskih tehnologija transformirao je upravljanje vodoopskrbnim sustavima. Tradicionalni način rada temeljen na periodičkim očitanjima zamjenjuju „pametne“ vodoopskrbne mreže, u kojima vodospreme postaju aktivni elementi sustava nadzora, upravljanja i optimizacije. Digitalne tehnologije omogućuju učinkovitije korištenje kapaciteta, smanjenje gubitaka vode te veću sigurnost i pouzdanost opskrbe.

5.1. Digitalizacija upravljanja

Suvremene vodospreme opremljene su senzorima i komunikacijskom opremom koji omogućuju kontinuirano praćenje rada u stvarnom vremenu. Podaci se prenose u upravljačke centre, gdje SCADA sustavi omogućuju daljinski nadzor i upravljanje vodospremama, crpnim stanicama i ostalim dijelovima mreže. Digitalni sustavi posebno su korisni u velikim regionalnim vodovodima jer omogućuju brzo otkrivanje kvarova i smanjuju troškove održavanja.
Važan dio digitalizacije čini optimizacija rada crpki, koja se temelji na podacima o razini vode, potrošnji i potrebama korisnika. Time se smanjuje potrošnja električne energije uz očuvanje sigurnosti opskrbe. Istodobno se kontinuirano prate razina vode, tlak, protok te kvaliteta vode (mutnoća, pH, rezidualni klor i temperatura), što omogućuje pravodobno otkrivanje kvarova i očuvanje zdravstvene ispravnosti vode. (Slika 3)



Slika 3. Vodospreme u suvremenim „pametnim“ vodoopskrbnim mrežama

5.2. Modeliranje i optimizacija rada

Hidraulički modeli omogućuju simulaciju rada vodoopskrbnih mreža bez zahvata na stvarnom sustavu te se koriste pri projektiranju i upravljanju. Najčešće korišteni alati su EPANET, WaterGEMS i InfoWorks WS Pro. Simulacijama se analiziraju različiti uvjeti rada, poput vršne potrošnje, kvarova ili izvanrednih događaja, što olakšava planiranje i donošenje odluka.

Modeliranje je posebno važno za određivanje optimalnog volumena vodosprema, čime se postiže ravnoteža između sigurnosti opskrbe i ekonomičnosti ulaganja. Također omogućuje planiranje mjera za izvanredne situacije, poput prekida napajanja, kvarova crpki, puknuća cjevovoda ili onečišćenja izvorišta. Time se povećava otpornost sustava i osigurava pouzdana opskrba stanovništva zdravstveno ispravnom vodom.

6. Izazovi projektiranja i eksploatacije vodosprema

Projektiranje i eksploatacija vodosprema predstavljaju složen zadatak jer je potrebno uskladiti tehničke, ekonomske i zdravstvene zahtjeve vodoopskrbnog sustava. Osnovni cilj je osigurati dovoljan volumen vode za izravnavanje neravnomjerne potrošnje, protupožarnu zaštitu i sigurnost opskrbe, uz očuvanje kvalitete vode i ekonomičnost izgradnje. Pri tome se kao najvažniji izazovi ističu pravilno dimenzioniranje vodospreme te održavanje zdravstvene ispravnosti vode tijekom skladištenja. Jedan od čestih problema je predimenzioniranost vodospreme. Ako je volumen spremnika znatno veći od stvarnih potreba sustava, voda se zadržava dulje vrijeme prije nego što bude isporučena korisnicima. Takvo produljeno vrijeme zadržavanja može dovesti do pogoršanja kvalitete vode, smanjenja koncentracije dezinfekcijskog sredstva i povećanog rizika od razvoja mikroorganizama. Osim toga, veći spremnici zahtijevaju veća početna ulaganja te povećavaju troškove održavanja i upravljanja objektom. S druge strane,

poddimenzioniranost vodospreme također može imati ozbiljne posljedice. Nedovoljan volumen vode smanjuje raspoložive rezerve za pokrivanje vršne potrošnje, protupožarne potrebe i izvanredne situacije. Posljedica mogu biti nestabilni tlakovi u mreži, otežana opskrba udaljenih potrošača te povećani rizik od prekida vodoopskrbe u slučaju kvara ili povećane potrošnje. Poseban izazov predstavlja očuvanje kvalitete vode tijekom skladištenja u vodospremama. Dugotrajno zadržavanje vode može uzrokovati smanjenje koncentracije rezidualnog dezinfekcijskog sredstva, razvoj biofilma na unutarnjim površinama spremnika te pogoršanje organoleptičkih svojstava vode, poput okusa, mirisa i boje. Takve promjene mogu negativno utjecati na zdravstvenu ispravnost vode i zadovoljstvo korisnika. Zbog navedenih razloga suvremeno projektiranje vodosprema ne temelji se isključivo na hidrauličkim proračunima potrebnog volumena, već uključuje i zdravstvene kriterije povezane s kvalitetom vode. Primjenom hidrauličkih modela, sustava nadzora i odgovarajućih mjera održavanja nastoji se postići optimalna veličina vodospreme koja će istodobno osigurati pouzdanu opskrbu i očuvanje zdravstvene ispravnosti vode za piće.

7. Zaključak

Vodospreme predstavljaju nezamjenjiv element suvremenih vodoopskrbnih sustava te imaju ključnu ulogu u osiguravanju pouzdane, sigurne i kontinuirane opskrbe stanovništva pitkom vodom. Njihova funkcija nadilazi puko skladištenje vode te obuhvaća regulaciju tlakova u mreži, izravnavanje dnevnih i sezonskih oscilacija potrošnje, osiguravanje rezervi za izvanredne situacije, poput kvarova, nestanka električne energije ili požara, kao i doprinos energetskoj učinkovitosti cjelokupnog sustava. Pravilno projektirane i dimenzionirane vodospreme omogućuju stabilniji rad crpnih stanica, smanjuju opterećenje infrastrukture te pridonose produljenju vijeka trajanja cjevovoda i ostalih elemenata vodoopskrbne mreže.

Razvoj suvremenih tehnologija, posebice koncepta „pametnih“ vodoopskrbnih mreža i digitalnih sustava upravljanja, dodatno je naglasio važnost vodosprema u modernom upravljanju vodnim resursima. Zahvaljujući primjeni senzora, sustava daljinskog nadzora, automatizacije i naprednih algoritama za upravljanje, vodospreme više nisu samo pasivni spremnici vode, već postaju aktivni elementi hidrauličkog sustava. Njihova integracija u sustave za praćenje i upravljanje u stvarnom vremenu omogućuje optimizaciju rada mreže, pravodobno otkrivanje odstupanja i kvarova te učinkovitije upravljanje raspoloživim količinama vode i energetskim resursima.

Osim tehničke i operativne uloge, vodospreme imaju i značajan utjecaj na održivost vodoopskrbnih sustava. U uvjetima klimatskih promjena, sve izraženijih sušnih razdoblja i rastućih potreba za vodom, njihova sposobnost osiguravanja rezervi i povećanja otpornosti sustava postaje sve važnija. Učinkovito upravljanje volumenima vode doprinosi racionalnijem korištenju prirodnih resursa, smanjenju gubitaka vode te povećanju pouzdanosti opskrbe u izvanrednim okolnostima.

Optimalno dimenzioniranje, pouzdano upravljanje i kvalitetna integracija vodosprema u suvremene sustave nadzora i upravljanja predstavljaju ključne preduvjete za siguran, održiv

i ekonomski učinkovit rad vodoopskrbnih sustava budućnosti. Kontinuirano ulaganje u modernizaciju infrastrukture, razvoj novih tehnologija i unapređenje metoda upravljanja omogućit će još veću učinkovitost rada sustava, bolju prilagodbu promjenjivim uvjetima te dugoročno očuvanje kvalitete i sigurnosti opskrbe pitkom vodom za sadašnje i buduće generacije.

8. Literatura

[1] Creaco, Enrico; Campisano, Alberto; Franchini, Marco; Modica, Carlo. Unsteady Flow Modeling of Pressure Real-Time Control in Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 143(9), (2017). DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000821.

[2] Mosethle, Thapelo; Du, Shengzhi;Monacelli, Eric; Hamam, Yskandar. A Survey of Pressure Control Approaches in Water Supply Systems. Water, 12(6), (2020). DOI: 10.3390/w12061732.

[3] Patelis, Menelaos; Kanakoudis, Vasilis; Kravvari, Anastasia. Pressure Regulation vs. Water Aging in Water Distribution Networks. Water, 12(5), (2020). DOI: 10.3390/w12051323.

[4] Trifunović, Nemanja; Abunada, Mohanad; Babel, Mukand; Kennedy, Maria. The Role of Balancing Tanks in Optimal Design of Water Distribution Networks. AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 64(5), 610–621. (2015). DOI: 10.2166/aqua.2014.043.

[5] Fecarotta, Oreste; Carravetta, Armando; Ramos, Helena. Tuning a PAT Hydropower Plantin a Water Supply Network to Improve System Effectiveness. Water Resources Management, 29(3), 699–714. DOI: 10.1007/s11269-014-0836-3.

[6] Mays, Larry. Water Resources Engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons. (2010) ISBN: 978-0470460641

[7] Margeta, Jure. Vodopskrba naselja – planiranje, projektiranje, upravljanje,obrada vode. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split 2010

Zastupljenost tema održivosti u visokom obrazovanju u području građevinarstva i arhitekture
The Representation of Sustainability Topics in Higher Education in Civil Engineering and Architecture

D. Obradović[1]

[1]Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

Autor za korespodenciju. E-mail: dobradovic@gfos.hr

Sažetak
Održivi razvoj, definiran kao razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjih generacija bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija, predstavlja ključni koncept suvremenog društvenog, gospodarskog i obrazovnog razvoja. U građevinskom i arhitektonskom sektoru njegova je primjena posebno značajna zbog velikog utjecaja na okoliš, potrošnju prirodnih resursa i energetsku učinkovitost. Ovaj rad analizira zastupljenost tema održivosti u visokom obrazovanju u Republici Hrvatskoj u području građevinarstva i arhitekture. Istraživanje obuhvaća pregled nastavnih planova i programa više visokoobrazovnih institucija te identifikaciju kolegija čiji nazivi i sadržaji uključuju teme povezane s održivošću, poput zelene gradnje, zaštite okoliša, održive arhitekture i energetski učinkovite gradnje. Analizirani su kolegiji različitih ECTS opterećenja, broja nastavnih sati i definiranih ishoda učenja, pri čemu su izdvojeni njihovi osnovni ciljevi i ključne tematske cjeline. Rezultati analize pokazuju da su teme održivosti i zaštite okoliša značajno zastupljene u obrazovanju budućih inženjera i arhitekata, od temeljnih ekoloških načela do primjene konkretnih tehničkih i projektantskih rješenja u graditeljstvu. Rad naglašava važnost sustavne integracije načela održivosti u kurikulume visokog obrazovanja te doprinosi razumijevanju razvoja kompetencija potrebnih za održivu i klimatski odgovornu gradnju.

Ključne riječi: arhitektura, građevinarstvo, održiva gradnja, održivi razvoj, visoko obrazovanje

Abstract
Sustainable development, defined as development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs, represents a key concept in contemporary social, economic, and educational development. Its application is particularly important in the construction and architectural sectors due to their significant impact on the environment, natural resource consumption, and energy efficiency. This paper analyses the representation of sustainability topics in higher education in the

Republic of Croatia within the fields of civil engineering and architecture. The research includes a review of curricula and study programmes at several higher education institutions, as well as the identification of courses whose titles and content incorporate sustainability-related topics such as green building, environmental protection, sustainable architecture, and energy-efficient construction. Courses with different ECTS workloads, teaching hours, and defined learning outcomes were analysed, with particular attention given to their main objectives and key thematic areas. The results indicate that sustainability and environmental protection topics are significantly represented in the education of future engineers and architects, ranging from fundamental ecological principles to the application of specific technical and design solutions in the construction sector. The paper highlights the importance of systematically integrating sustainability principles into higher education curricula and contributes to a better understanding of the competencies required for sustainable and climate-responsible construction.

Key words: architecture, civil engineering, sustainable construction, sustainable development, higher education

1. Uvod

Ubrzana urbanizacija donijela je brojne razvojne mogućnosti, ali i izazove poput rastućih društvenih nejednakosti, povećane potrošnje resursa te veće ranjivosti urbanih područja na posljedice klimatskih promjena. Zbog toga se sve više naglašava potreba za razvojem održivih i otpornih gradova kroz odgovorno upravljanje resursima, učinkovite modele upravljanja i poticanje društvenih promjena usmjerenih prema održivosti [1].

Gradovi imaju ključnu ulogu u ostvarivanju održivog razvoja jer koncentriraju velik dio stanovništva, gospodarskih aktivnosti i potrošnje resursa [2].

Procjenjuje se da su urbana područja odgovorna za gotovo 70 % globalnih emisija ugljikova dioksida povezanih s potrošnjom energije, što ukazuje na njihov značajan utjecaj na klimatske promjene. Zbog velike koncentracije stanovništva, infrastrukture i gospodarskih aktivnosti, gradovi predstavljaju jedno od ključnih područja za provedbu mjera usmjerenih na povećanje energetske učinkovitosti, smanjenje emisija stakleničkih plinova i ostvarivanje ciljeva održivog razvoja [3], [4].

Posljednjih godina sve se veća pozornost posvećuje razvoju metoda za procjenu održivosti gradova, pri čemu se naglašava potreba za povezivanjem pokazatelja održivog razvoja s procjenom potrošnje resursa, okolišnih opterećenja te društvenih aspekata kvalitete života. Takav pristup omogućuje cjelovitije razumijevanje održivosti urbanih sredina i pruža kvalitetniju osnovu za planiranje održivog razvoja gradova i promicanje održivih životnih stilova [2].

Posebno važnu ulogu u ostvarivanju ciljeva održivog razvoja ima građevinski sektor.

On predstavlja jedan od ključnih izvora globalnih emisija stakleničkih plinova zbog visoke potrošnje energije tijekom uporabe zgrada te značajnih emisija povezanih s proizvodnjom građevinskih materijala i procesom izgradnje [5]. Istodobno, arhitektura i urbanističko planiranje imaju važan utjecaj na oblikovanje održivog izgrađenog okoliša te kvalitetu života

stanovništva. Zbog toga se od stručnjaka koji djeluju u području građevinarstva i arhitekture očekuje poznavanje načela održivosti i njihova primjena u profesionalnoj praksi.
Visoko obrazovanje ima ključnu ulogu u razvoju znanja, vještina i kompetencija potrebnih za provedbu održivih rješenja u graditeljstvu. Kroz studijske programe budući inženjeri i arhitekti stječu temeljna teorijska znanja i praktične kompetencije koje im omogućuju donošenje odgovornih odluka vezanih uz zaštitu okoliša, energetsku učinkovitost i održivo upravljanje resursima.
Odgovornost i ključna uloga sveučilišta u suočavanju s izazovima održivosti prepoznata je u različitim znanstvenim i stručnim područjima već desetljećima. O tome svjedoči i više od 30 međunarodnih deklaracija, dokumenata i inicijativa koje je podržalo više od 1400 visokoobrazovnih institucija diljem svijeta, čime se potvrđuje sve veća važnost integracije održivosti u sustav visokog obrazovanja [6–9]. Cilj rada je analizirati zastupljenost tema održivosti u visokom obrazovanju u području građevinarstva i arhitekture u Republici Hrvatskoj kroz pregled nastavnih planova i programa visokoobrazovnih institucija. Analizom nastavnih planova i programa identificirani su kolegiji povezani s održivošću te su izdvojene njihove osnovne tematske cjeline, ishodi učenja i obrazovni ciljevi. Rad je strukturiran u pet poglavlja. Nakon uvoda prikazana su temeljna obilježja i definicije održivog razvoja. U trećem poglavlju opisana je metodologija istraživanja, dok četvrto poglavlje donosi rezultate analize zastupljenosti tema održivosti u studijskim programima. U završnom poglavlju prikazana su zaključna razmatranja.

2. Definicije i temeljna obilježja održivog razvoja

U današnjim uvjetima ubrzanog gospodarskog razvoja, urbanizacije i sve većeg pritiska na prirodne resurse, koncept održivog razvoja postao je jedno od temeljnih načela u planiranju budućeg društvenog, gospodarskog i okolišnog razvoja. Nastoji povezati gospodarski napredak, društvenu uključenost i očuvanje okoliša te čini temelj mnogih politika i razvojnih inicijativa Europske unije (EU) [10]. Koncept održivog razvoja temelji se na ravnoteži između okolišne, društvene i gospodarske dimenzije, što je prikazano na Slici 1.

Slika 1. Temeljne dimenzije koncepta održivog razvoja (izrada autora)

Koncept održivog razvoja službeno je istaknut deklaracijom donesenom na ministarskoj konferenciji održanoj u Bergenu (Norveška) u svibnju 1990. godine, koju je organizirala Vlada Norveške u suradnji s Ekonomskom komisijom Ujedinjenih naroda za Europu.

Uzimajući u obzir međusobnu povezanost okoliša i gospodarstva, postaje očita potreba za uključivanjem zaštite i unapređenja okoliša u sva područja znanosti, gospodarstva, kulture i društvenog razvoja. Europska unija prihvatila je načela održivog razvoja 1990. godine, dok su ih Ujedinjeni narodi usvojili dvije godine kasnije. Širokom prihvaćanju ovog koncepta na globalnoj razini pridonijela je spoznaja o značajnim, a na pojedinim područjima i vrlo ozbiljnim promjenama u stanju okoliša [11].
Zakonska definicija održivog razvoja u Republici Hrvatskoj propisana je Zakonom o zaštiti okoliša (NN 80/13, 153/13, 78/15, 12/18, 118/18). U članku 4., stavku 6., alineji 33. održivi razvoj definiran je na sljedeći način: „Održivi razvitak je razvitak društva, koji kao temeljne kriterije uključuje ekološku, gospodarsku i socio-kulturnu održivost, i koji s ciljem unaprjeđenja kvalitete života i zadovoljavanja potreba današnjeg naraštaja uvažava iste mogućnosti zadovoljavanja potreba idućih naraštaja, te omogućuje dugoročno očuvanje kakvoće okoliša, georaznolikosti, bioraznolikosti te krajobraza“ [12].
Iako postoji više definicija održivog razvoja, najpoznatija i najčešće citirana definicija potječe iz izvješća Naša zajednička budućnost (engl. Our Common Future), poznatog i kao Brundtlandino izvješće. Izvorna definicija navedena je na engleskom jeziku i glasi: „Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“ [13] , što u prijevodu na hrvatski jezik znači: „Održivi razvoj je razvoj kojim se zadovoljavaju potrebe sadašnjih naraštaja, a da se pritom ne ugrožava mogućnost budućih naraštaja da zadovolje vlastite potrebe“ [14].
Ciljevi održivog razvoja predstavljaju sveobuhvatan globalni okvir usmjeren na rješavanje najvažnijih društvenih, gospodarskih i okolišnih izazova suvremenog svijeta. Njihova je svrha potaknuti države na djelovanje prema stvaranju pravednijeg društva, poboljšanju kvalitete života, osiguravanju dostupnog obrazovanja i zdravstvene skrbi, poticanju održivog gospodarskog razvoja te očuvanju prirodnih resursa i okoliša. Istodobno, ciljevi održivog razvoja nastoje osigurati ravnotežu između gospodarskog napretka, društvene dobrobiti i zaštite okoliša kako bi se sadašnjim i budućim generacijama omogućili jednaki uvjeti za život i razvoj.

3. Metodologija istraživanja

Istraživanje je provedeno metodom analize sadržaja nastavnih planova i programa visokoobrazovnih institucija u Republici Hrvatskoj koje izvode studijske programe iz područja građevinarstva, arhitekture i srodnih tehničkih disciplina. U analizu su uključeni sveučilišni i stručni studiji na kojima se obrazuju budući inženjeri građevinarstva, arhitekti i stručnjaci povezani s planiranjem, projektiranjem i izgradnjom građevina.
Analizirane su sljedeće institucije:

- Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
- Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu
- Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

- Međimursko veleučilište u Čakovcu

Podaci su prikupljeni iz javno dostupnih nastavnih planova i programa, informacijskih paketa kolegija te službenih mrežnih stranica analiziranih institucija.

Analiza je obuhvatila identifikaciju kolegija čiji nazivi, sadržaji ili ishodi učenja uključuju pojmove povezane s održivim razvojem, zaštitom okoliša, energetskom učinkovitošću, zelenom gradnjom, kružnim gospodarstvom, održivom arhitekturom, ekološkim projektiranjem i srodnim područjima. Za svaki identificirani kolegij evidentirani su naziv kolegija, vrsta studija, broj ECTS bodova, broj nastavnih sati te osnovni ishodi učenja i tematske cjeline.

Prikupljeni podaci analizirani su primjenom deskriptivne metode te su rezultati prikazani tablično i opisno. Slika 2 prikazuje slijed koraka provedenih tijekom istraživanja, od odabira institucija i prikupljanja podataka do klasifikacije kolegija i analize rezultata.

Odabir visokoobrazovnih institucija
↓
Prikupljanje nastavnih planova i programa
↓
Identifikacija studijskih programa
↓
Identifikacija kolegija povezanih s održivošću
↓
Analiza sadržaja kolegija
(naziv, ECTS, sati, ishodi učenja, teme)
↓
Usporedna analiza institucija i programa
↓
Analiza i usporedba rezultata
↓
Zaključci istraživanja

Slika 2. Tijek metodologije istraživanja (izrada autora)

Ograničenje istraživanja odnosi se na činjenicu da su analizirani isključivo javno dostupni dokumenti, zbog čega nije bilo moguće procijeniti stvarni opseg provedbe sadržaja održivosti u nastavi niti razinu stečenih kompetencija studenata.

4. Analiza zastupljenosti tema održivosti u studijskim programima

U nastavku su prikazani rezultati analize zastupljenosti tema održivosti po pojedinim visokoobrazovnim institucijama, pri čemu su izdvojeni relevantni kolegiji.

4.1. Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Na studijskim programima Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu identificirani su sljedeći kolegiji koji obrađuju teme održivosti:

- Zaštita okoliša
- Zaštita voda
- Geotehnika i zaštita okoliša
- Zelena gradnja
- Energetska obnova zgrada [15]
- Ekohidrologija [16].

Kolegiji obuhvaćaju teme energetske učinkovitosti, okolišnog opterećenja i održivih materijala.
Kolegij Zaštita okoliša javlja se na više smjerova kao i na dvije razine (prijediplomskom i diplomskom studiju) te će isti promatrati kao jedan.

4.2. Arhitektonski fakultet, Sveučilište u Zagrebu
Na studijskim programima Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu identificirani su sljedeći kolegiji koji obrađuju teme održivosti:

- Održiva arhitektura [17]
- Održivo građenje 1
- Održivo građenje 2 [18].

Kolegiji obuhvaćaju teme održive arhitekture, energetske učinkovitosti, kružnog gospodarstva, certificiranja zgrada i primjene ekološki prihvatljivih materijala. Poseban naglasak stavljen je na bioklimatsko projektiranje, smanjenje okolišnog utjecaja građevina, integraciju zelenila u izgrađeni prostor te primjenu suvremenih metoda procjene održivosti i certificiranja zgrada.
U okviru sveučilišnog specijalističkog studija Arhitektura i urbanizam - Prostorno uređenje, kroz ciklus Strateško planiranje i održivi razvoj održivost je integrirana kroz više tematskih cjelina koje obrađuju teme prostornog planiranja, održivog urbanog razvoja, zaštite graditeljskog i prirodnog nasljeđa te participativnih pristupa planiranju. Program je usmjeren na razvoj kompetencija za strateško i održivo upravljanje prostornim razvojem [19].

4.3. Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Na studijskim programima Građevinskoga i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku identificirani su sljedeći kolegiji koji obrađuju teme održivosti:

- Zaštita okoliša [20]
- Zaštita i pročišćavanje voda
- Energetski učinkovite zgrade [21]
- Prostorno planiranje i zaštita okoliša [22]
- Energetski učinkovita i održiva arhitektura
- Zaštita okoliša [23]

Kolegiji obuhvaćaju teme zaštite okoliša, upravljanja i pročišćavanja voda, energetske učinkovitosti zgrada te održivog prostornog planiranja. Poseban naglasak stavljen je na smanjenje okolišnog opterećenja, racionalno korištenje resursa i integraciju načela održivog razvoja u građevinsko i prostorno planiranje.

Analiza kolegija provedena je zaključno s akademskom godinom 2025./2026. za sve analizirane studijske programe, dok je za stručni prijediplomski studij Građevinarstvo obuhvaćena akademska godina 2024./2025.

4.4. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, Sveučilište u Splitu

Na studijskim programima Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, Sveučilišta u Splitu identificirani su sljedeći kolegiji koji obrađuju teme održivosti:

- Zaštita i pročišćavanje komunalnih, otpadnih i oborinskih voda [24]
- Integralna zaštita prostora [25].

Kolegiji obuhvaćaju teme zaštite voda, pročišćavanja otpadnih i oborinskih voda, integralnog planiranja prostora te utjecaja urbanizacije na okoliš. Naglasak je stavljen na održivo upravljanje vodnim resursima, zaštitu ekosustava i integrirane pristupe prostornom i okolišnom planiranju.

4.5. Građevinski fakultet u Rijeci, Sveučilište u Rijeci

Na studijskim programima Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Rijeci identificirani su sljedeći kolegiji koji obrađuju teme održivosti:

- Odvodnja i pročišćavanje otpadnih voda
- Zaštita okoliša [26]
- Zaštita okoliša i održiva gradnja [27].

Kolegiji obuhvaćaju teme ekosustava, utjecaja građevinskih zahvata na okoliš, klimatskih promjena, gospodarenja otpadom te održive i energetski učinkovite gradnje. Naglasak je stavljen na primjenu načela održivosti u graditeljstvu, kružni tok materijala i smanjenje okolišnog opterećenja građevinskih aktivnosti.

4.6. Međimursko veleučilište u Čakovcu

Na studijskim programima Međimursko veleučilište u Čakovcu, Stručni prijediplomski studij Održivi razvoj, Smjer Održiva gradnja identificirani su sljedeći kolegiji koji obrađuju teme održivosti:

- Održivost graditeljstva
- Održivost komunalija [28].

Kolegiji obuhvaćaju teme održive gradnje, izbora materijala i tehnologija, reciklaže, sanacije te održivog planiranja. Naglasak je stavljen na održive sustave komunalne infrastrukture, vodoopskrbu, kanalizaciju i gospodarenje otpadom u kontekstu održivog razvoja.

4.7. Združeni diplomski studij održive i zelene gradnje

Planirani združeni diplomski studij „Održiva i zelena gradnja“ predstavlja važan iskorak prema obrazovanju stručnjaka usmjerenih na održivi razvoj u građevinskom sektoru. Inicijativa za razvoj studija pokrenuta je na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, uz planiranu suradnju više hrvatskih sveučilišta. Uvođenje ovog interdisciplinarnog studijskog programa trebalo bi odgovoriti na sve veću potrebu tržišta za kadrovima koji razumiju principe energetske učinkovitosti, održive gradnje i zelene

infrastrukture. Program je strukturiran kroz sedam modula i trajao bi četiri semestra, a uključuje znanja iz područja građevinarstva, arhitekture, geodezije i zaštite okoliša [29].

4.8. Sumarni pregled analiziranih kolegija

Na temelju provedene analize pojedinačnih studijskih programa izrađen je usporedni pregled kolegija povezanih s održivošću. Kolegiji su u Tablici 1. prikazani usporedno prema institucijama, gradu, broju ECTS-a, broju sati, glavnim ciljevima te ključnim temema/sadržaju s ciljem identifikacije razine i načina zastupljenosti održivosti u visokom obrazovanju.

Tablica 1. Usporedni prikaz analiziranih kolegija (izrada autora prema [15 - 28])

Kolegij (grad)	ECTS	Broj sati (P+V+S)	Glavni ciljevi	Ključne teme/sadržaj
Zaštita okoliša (ZG)	3,0	30+0+0	Teorijska znanja o osnovnim ekološkim pojmovima i procesima, utjecaj čovjeka na okoliš	Postupci zaštite okoliša, zakonska regulativa u području zaštite okoliša, pojam održivi razvoj
Zaštita voda (ZG)	4,0	30+15+0	Teorijska i praktična znanja o zaštiti vodnih sustava i upravljanju kakvoćom voda.	Onečišćenje i zaštita voda, pročišćavanje otpadnih voda, upravljanje kakvoćom voda, zakonska regulativa, modeliranje pronosa zagađenja
Geotehnika i zaštita okoliša (ZG)	4,5	30+15+0	Teorijska i praktična znanja o geotehničkoj zaštiti okoliša i gospodarenju otpadom.	Odlagališta otpada, zaštita tla i podzemnih voda, pronos zagađenja, geosintetici, geotehnički aspekti zaštite okoliša
Zelena gradnja (ZG)	4,5	15+15+15	Koncepti kružnog gospodarstva, upravljanje otpadom, ekološki i ekonomski aspekti zelene gradnje	Strategije upravljanja otpadom, certifikati, upravljanje zelenim zgradama
Energetska obnova zgrada (ZG)	6,0	15+45+0	Napredna znanja o procjeni i unapređenju energetske učinkovitosti postojećih zgrada.	Energetska učinkovitost, održiva obnova zgrada, toplinska ugodnost, energetski učinkoviti materijali i sustavi, projektiranje mjera obnove
Ekohidrologija (ZG)	6,0	0+0+30	Održivo upravljanje vodnim resursima i zaštita okoliša primjenom naprednih inženjerskih pristupa.	Zaštita voda, održivi razvoj, upravljanje vodnim sustavima, procjena rizika, pročišćavanje i ponovna uporaba voda, GIS i monitoring vodnih tijela
Održiva arhitektura (ZG)	1,0	15+0+15	Energetski učinkovit i ekološki pristup arhitekturi i urbanizmu, primjena inovativnih materijala	Izvori energije, bioklimatski pristup, pasivna arhitektura, prirodni materijali, simulacije, zdravlje

Održivo građenje 1 (ZG)	2,0	15+0+0	Primjena načela održivog projektiranja, odabir materijala, energetska učinkovitost i sanacija građevina.	Održivo građenje, materijali, energetska učinkovitost, obnovljivi izvori energije, sanacija zgrada.
Održivo građenje 2 (ZG)	2,0	15+0+0	Primjena načela zaštite korisnika, zgrade i okoliša pri projektiranju i odabiru materijala i konstrukcija.	Zaštita od buke i požara, fizikalna svojstva zgrada, materijali i konstrukcije, zakonska regulativa
Zaštita okoliša (OS)	2,0	20+0+10	Podizanje svijesti o okolišu i utjecaju građevinskih zahvata.	Pojam okoliša, zrak, voda, tlo, održivi razvoj, studije utjecaja
Zaštita i pročišćavanje voda (OS)	5,0	30+25+5	Teorijska i praktična znanja o zaštiti voda i tehnologijama pročišćavanja otpadnih voda.	Vodni ekosustavi, kakvoća i zaštita voda, otpadne vode, pročišćavanje voda, obrada mulja, održivo upravljanje vodnim resursima
Energetski učinkovite zgrade (OS)	5,0	30+30+0	Stjecanje znanja o energetskoj učinkovitosti zgrada i primjeni mjera za smanjenje potrošnje energije.	Energetska regulativa, toplinska zaštita zgrada, pasivne kuće, energetske potrebe za grijanje i hlađenje, toplinski mostovi, zrakopropusnost zgrada, ekonomska analiza energetskih mjera
Prostorno planiranje i zaštita okoliša (OS)	5,0	30+30+0	Upoznavanje s načelima prostornog planiranja i utjecajem gradnje na okoliš.	Prostorno planiranje, zakonska regulativa, urbanistički planovi, utjecaj građevina na okoliš, zaštita okoliša, održivi razvoj
Energetski učinkovita i održiva arhitektura (OS-arh)	2,0	30+0+0	Projektiranje i proračuni za EE zgrade, pasivne kuće, termografija	Koeficijent prolaska topline, BlowerDoor, toplinski mostovi, zakonodavni okvir, energ. certifikati, CAD alati
Zaštita okoliša (OS-arh)	2,0	30+0+0	Upoznavanje s osnovama okoliša i razvojem svijesti o utjecaju čovjeka na okoliš.	Sastavnice okoliša, održivi razvoj, zakonska regulativa, utjecaj građevinskih zahvata, studije utjecaja na okoliš, održivo građenje
Zaštita i pročišćavanje komunalnih, otpadnih i oborinskih voda (ST)	5,0	30+30+0	Stjecanje znanja o upravljanju i projektiranju sustava pročišćavanja voda.	Zagađenje voda, bilanca onečišćenja, pročišćavanje otpadnih i oborinskih voda, projektiranje uređaja, ponovna uporaba i zaštita okoliša
Integralna zaštita prostora (ST-arh)	2,0	30+0+0	Upoznavanje s utjecajem urbanizacije na okoliš, integralni pristupi, planiranje zaštite prostora.	Urbanizacija i okoliš, ekosustavi, pritisci, strategije zaštite, upravljanje, studije utjecaja
Odvodnja i pročišćavanje otpadnih voda (RI)	6,0	30+30+0	Teorijska i praktična znanja o odvodnji, pročišćavanju	Kanalizacijski sustavi, otpadne i oborinske vode, procesi pročišćavanja,

			otpadnih voda i zaštiti vodnih sustava.	zaštita prijemnika, standardi kakvoće voda.
Zaštita okoliša (RI)	4,0	15+0+30	Ekosustavi, biogeokemijski ciklusi, utjecaj građevinskih radova, zakoni	Zrak, voda, more, tlo, klimatske promjene, otpad, zakoni
Zaštita okoliša i održiva gradnja (RI)	3,0	10+0+20	Utjecaj gradnje na okoliš, principi održivosti, energetska učinkovitost, otpad	Ciklus materijala, reciklaža, alternativni izvori, zakonski okvir
Održivost graditeljstva (ČK)	5,0	30+30+0	Osposobiti studente da razmišljaju održivo u graditeljstvu, izbor materijala, tehnologija, održavanje.	Održiva proizvodnja, tehnologije gradnje, reciklaža, sanacija, održivo planiranje stambenih i urbanih cjelina
Održivost komunalija (ČK)	4,0	15+30+0	Komunalna infrastruktura - voda, otpad, sanacija	Vodoopskrba, kanalizacija, održivi sustavi

5. Zaključak

Pregled analiziranih kolegija pokazuje da je održivost sustavno integrirana u visoko obrazovanje građevinskih i arhitektonskih studija u Republici Hrvatskoj, kroz temeljna ekološka i zakonodavna znanja te specijalizirana tehnička i projektantska rješenja. Uočava se raznolik pristup održivosti, uz naglasak na zaštiti okoliša, energetskoj učinkovitosti i racionalnom upravljanju resursima.

Kolegiji se mogu grupirati u nekoliko osnovnih tematskih cjelina. Prvu skupinu čine temeljni ekološki i zakonodavni kolegiji koji razvijaju svijest o okolišu, utjecaju građevinskih zahvata te regulatornim okvirima zaštite okoliša i voda. Drugu skupinu čine kolegiji usmjereni na energetsku učinkovitost i održivu gradnju, koji obrađuju pasivne i energetski učinkovite zgrade, toplinsku zaštitu, obnovu postojećeg fonda zgrada te primjenu suvremenih mjernih i analitičkih alata. Treću skupinu čine stručno-tehnički i inženjerski orijentirani kolegiji koji integriraju principe kružnog gospodarstva, održivih materijala, sanacije, gospodarenja otpadom te certificiranja zgrada i sustava. Četvrta skupina obuhvaća kolegije usmjerene na vodne sustave i infrastrukturu, uključujući pročišćavanje otpadnih i oborinskih voda, upravljanje kakvoćom voda i održivo upravljanje vodnim resursima. Peta skupina odnosi se na prostorno planiranje i integralne pristupe zaštiti prostora, gdje se održivost promatra kroz odnos urbanizacije, okoliša i planskog upravljanja prostorom.

Analiza pokazuje da se održivost ne pojavljuje samo kao izdvojena tema, već kao horizontalno integriran koncept koji je prisutan kroz različite razine studija i različite tipove kolegija. Posebno se ističe trend jačanja interdisciplinarnog pristupa, u kojem se povezuju tehnički, ekološki i planski aspekti razvoja građevinskog i urbanog prostora. Razvoj kompetencija kroz visoko obrazovanje čini temelj za primjenu održivih tehnologija, materijala i konstrukcija u građevinskoj praksi. U cjelini, rezultati ukazuju da hrvatska visokoobrazovna institucijska mreža u području građevinarstva i arhitekture sustavno razvija kompetencije budućih inženjera i arhitekata u smjeru održivog razvoja, s naglaskom na energetsku učinkovitost, zaštitu okoliša, održivo upravljanje resursima i integrirano prostorno planiranje. Daljnji razvoj kurikuluma u smjeru jačanja praktičnih i interdisciplinarnih sadržaja može dodatno doprinijeti pripremi stručnjaka za izazove klimatski odgovorne i održive gradnje.

Također je potrebno istaknuti da je tijekom istraživanja u pojedinim slučajevima bilo otežano jednoznačno identificirati sve kolegije povezane s održivošću i analiziranim temama, te je moguće da su određeni kolegiji ili studijski programi nenamjerno izostavljeni iz analize. Međutim, s obzirom na to da je riječ o preliminarnom istraživanju, detaljnija i sveobuhvatnija analiza zahtijevala bi opsežniji i dugotrajniji rad, što nije bilo predmet ovog istraživanja, a također bi premašilo dopuštenu duljinu rada.

Acknowledgements
This research was funded by the European Union – NextGenerationEU through the project Scientific Framework for Environmentally Sustainable Construction Technologies, Materials, and Structures (581-UNIOS-72).

6. Literatura

[1] Krueger, H. Elisabeth; Constantino, M. Sara; Centeno, A. Miguel i sur. Governing sustainable transformations of urban social-ecological-technological systems // *npj Urban Sustainability*, 2 (2022), 1. (ISSN 2661-8001)
[2] Wiedmann, Thomas; Allen, Cameron. City footprints and SDGs provide untapped potential for assessing city sustainability // *Nature Communications*, 12 (2021), 1; 3758. (ISSN 2041-1723)
[3] Seto, C. Karen; Dhakal, Shobhakar i sur. Human Settlements, Infrastructure, and Spatial Planning. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. (ISBN 9781316396995)
[4] Luqman, Muhammad; Rayner, J. Peter; Gurney, R. Kevin. On the impact of urbanisation on CO2 emissions // *npj Urban Sustainability*, 3 (2023), 1. (ISSN 2661-8001)
[5] IPCC Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, 2026. [Online]. Dostupno na: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/. (Pristupljeno 11.06.2026.)
[6] Grindsted, S. Thomas; Holm, Tove. Thematic Development of Declarations on Sustainability in Higher Education // *Environmental Economics,* 3 (2012), 1. (ISSN 1998-6041)
[7] Lozano, Rodrigo; Ceulemans, Kim; Alonso-Almeida, Mar i sur. A review of commitment and implementation of sustainable development in higher education: results from a worldwide survey // *Journal of Cleaner Production*, 108 (2015), pp. 1–18. (ISSN 1879-1786)
[8] Wright, Tarah. The Evolution of Sustainability Declarations in Higher Education, in Higher Education and the Challenge of Sustainability, Dordrecht: Springer Netherlands, 2004, 7-19. (ISBN 978-0-306-48515-2)
[9] Sánchez-Carracedo, Fermín; Segalas, Jordi; Bueno, Gorka. Tools for Embedding and Assessing Sustainable Development Goals in Engineering Education // *Sustainability*, 13 (2021), 21, 12154. (ISSN 2071-1050)
[10] EUR-Lex, Sustainable development, 2025. [Online]. Dostupno na: https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/glossary/sustainable-development.html. (Pristupljeno 25.08.2025)
[11] Stević, Svetlana; Vasilski, Dragana, Održiva arhitektura. Beograd, Srbija: Zadužbina Andrejević, 2010. (ISBN 978-86-7244-836-8)
[12] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o zaštiti okoliša. Republika

Hrvatska, 2018.
[13] United Nations, Report of the World Commission on Environment and Development, Our Common Future, 1987.
[14] Bačun, Dubravka; Matešić, Mirjana; Omazić, Mislav Ante. Leksikon održivog razvoja. Zagreb: Hrvatski poslovni savjet za održivi razvoj, 2012. (ISBN 978-953-98964-3-8)
[15] Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. Sveučilišni prijediplomski i diplomski studij Građevinarstvo; Studijski programi s ishodima učenja. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2024.
[16] Građevinski fakultet Zagreb. Popis predmeta, 2025. [Online]. Dostupno na: https://nastava.grad.hr/course/226858/2025-2026. (Pristupljeno 15.06.2026.)
[17] Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, Prijediplomski studij arhitekture i urbanizma, nastavni program. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, 2023.
[18] Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet. Diplomski studij arhitekture i urbanizma, nastavni program. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, 2022.
[19] Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, Specijalistički studij: Prostorno uređenje – Ciklus strateško planiranje i održivi razvoj, 2026. [Online]. Dostupno na: https://www.arhitekt.hr/hr/nastava/poslijediplomski-studiji/specijalisticki-studij/. (Pristupljeno 15.06.2026.)
[20] Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek. Sveučilišni prijediplomski studij Građevinarstvo, Izvod iz studijskog programa. Osijek, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2024.
[21] Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek. Sveučilišni diplomski studij građevinarstvo, studijski program. Osijek, 2024.
[22] Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Stručni prijediplomski studij građevinarstvo, izvod iz studijskog programa. Osijek, 2024.
[23] Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek. Sveučilišni prijediplomski studij arhitektura i urbanizam. Osijek, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2024.
[24] Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo - smjer Hidrotehnika, 2026. [Online]. Dostupno na: https://gradst.unist.hr/studiji/građevinarstvo/sveucilisni-diplomski-studij-građevinarstvo/smjer-hidrotehnika. (Pristupljeno 15.06.2026.)
[25] Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije. Studijski program, Diplomski sveučilišni studij Arhitektura i urbanizam. Split: Sveučilište u Splitu Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2020.
[26] Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet. Plan i program sveučilišnog diplomskog studijskog programa Građevinarstvo. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2025.
[27] Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet. Plan i program sveučilišnog prijediplomskog studija Građevinarstvo. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2024.
[28] Međimursko veleučilište u Čakovcu. Stručni prijediplomski studij Održivi razvoj, Studijski program, 2025. [Online]. Dostupno na: https://www.mev.hr/studijski-programi/odrzivi-razvoj/studijski-program/. (Pristupljeno 24.09.2025.)
[29] Hrvatski savjet za zelenu gradnju, Studij zelene gradnja - studij za budućnost, 2023. [Online]. Dostupno na: https://gbccroatia.org/services/studij-zelene-gradnje-studij-za-buducnost/. (Pristupljeno 24.09.2025.)

Stambeni fond Grada Osijeka: statistička obrada izgradnje i kvalitativna procjena prostornih rizika

Housing Stock of the City of Osijek: Statistical Analysis of Construction and Qualitative Assessment of Spatial Risks

M. Anušić[1], A. Dujak[1], M. Katavić[1], D. Obradović[1,*], J. Radić[1]

[1]Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: dobradovic@gfos.hr

Sažetak

Rad obrađuje stambeni fond Grada Osijeka i Osječko-baranjske županije na temelju podataka Državnog zavoda za statistiku, s naglaskom na trendove izgradnje stambenih zgrada u odabranim vremenskim intervalima. Obrađuje se broj i veličina završenih stambenih zgrada u Gradu Osijeku i Osječko-baranjskoj županiji, uključujući ukupnu građevinsku površinu. U okviru novogradnje razmatra se broj novoizgrađenih stanova, te njihova korisna površina kako bi se ocijenile karakteristike stambene ponude. Poseban naglasak stavljen je na obradu nastanjenih stanova prema godini gradnje te broju članova kućanstava, čime se ispituje stupanj usklađenosti između stambene ponude i demografskih potreba stanovništva. Na temelju dobivenih rezultata, u drugom dijelu rada provodi se kvalitativna procjena izloženosti prostornim rizicima, pri čemu se uzimaju u obzir starost i pretpostavljena građevinska otpornost stambenog fonda. Rezultati pružaju uvid u dugoročne trendove razvoja stambenog fonda te se ističu implikacije za prostorno planiranje, stambenu politiku i upravljanje rizicima od prirodnih nepogoda na razini Grada Osijeka i Osječko-baranjske županije.

Ključne riječi: stambeni fond, novogradnja, trendovi gradnje, Osijek, prostorni rizici, prostorno planiranje

Abstract

The paper examines the housing stock of the City of Osijek and Osijek-Baranja County based on data from the Croatian Bureau of Statistics, focusing on residential building construction trends across selected time intervals. It examines the number and size of completed residential buildings in the City of Osijek and Osijek-Baranja County, including their total gross floor area. Within the context of new construction, the number of newly built

apartments and their useful floor area are considered in order to evaluate the characteristics of the housing supply. Special emphasis is placed on analysing occupied apartments by year of construction and household size, thereby examining the level of alignment between the housing supply and the demographic needs of the population. Based on the obtained results, and considering the age and assumed structural resilience of the housing stock, the second part of the paper conducts a qualitative assessment of exposure to spatial risks. The results provide insight into long-term trends in housing stock development and highlight the implications for spatial planning, housing policy, and natural disaster risk management at the level of the City of Osijek and Osijek-Baranja County.

Key words: housing stock, new residential construction, construction trends, Osijek, spatial risks, spatial planning

1. Uvod

Prema novijim procjenama, oko 55 % svjetskog stanovništva danas živi u urbanim područjima. Očekuje se da će se taj udio do 2050. godine povećati na približno 68 % [1], [2]. Istodobno, nastavak procesa urbanizacije, odnosno postupnog preseljavanja stanovništva iz ruralnih u urbana područja, zajedno s ukupnim rastom svjetske populacije, mogao bi do sredine 21. stoljeća dovesti do povećanja broja stanovnika gradova za dodatnih 2,5 milijarde ljudi [1]. Ovi procesi ukazuju na kontinuirani porast značaja urbanih prostora te posljedično i na sve veću važnost planiranja i razvoja stambenog fonda. Stambeni fond pritom predstavlja jednu od ključnih komponenti urbanih sustava, pri čemu njegova struktura i dugotrajnost odražavaju povijesne obrasce urbanizacije i društveno-ekonomskog razvoja. Dugotrajnost stambenog fonda predstavlja jedan od ključnih elemenata urbane inertnosti [3]. Istraživanja na području ruskih gradova pokazala su da unatoč snažnim političkim i ekonomskim promjenama osnovne karakteristike stanovanja često pokazuju kontinuitet kroz više desetljeća, pa čak i stoljeća. Povijesni obrasci izgradnje stoga mogu značajno utjecati na suvremenu strukturu stambenog fonda te njegovu otpornost na prostorne i prirodne rizike [3]. Poznavanje budućih obilježja kućanstava predstavlja važnu podlogu za javne politike, prostorno planiranje i donošenje odluka. Planiranje razvoja stanovanja zahtijeva značajna privatna i javna ulaganja, pri čemu se, nakon što je građevinski projekt jednom pokrenut, investicijske odluke ne mogu uvijek jednostavno i brzo prilagoditi promijenjenim okolnostima [4]. Stambena dimenzija ima značajan utjecaj na ukupnu kvalitetu života stanovništva [5], [6], pri čemu stanovanje predstavlja jednu od ključnih sastavnica svakodnevnog funkcioniranja i dobrobiti pojedinaca. Zbog toga bi stambene jedinice trebale biti prilagođene potrebama i karakteristikama svojih korisnika. Osobne karakteristike poput dobi i spola, životne faze, prihoda, obrazovanja, obiteljske strukture i potreba stvaraju različita očekivanja od stanovanja [7]. Na prostornu strukturu Grada Osijeka utjecali su tranzicija iz planskog u tržišno gospodarstvo, raspad Jugoslavije i osamostaljenje Hrvatske, ratna razaranja i demografski gubici tijekom Domovinskog rata, razdoblje poslijeratne obnove te promjene u prometnoj i geopolitičkoj poziciji grada. Nakon prvih godina obnove, djelomičnog oporavka od ratnih posljedica te procesa privatizacije,

započinje razdoblje intenzivnije stambene i poslovne izgradnje. Uvođenje tržišnog gospodarstva donijelo je nove zakonitosti u funkcioniranju urbanog i gospodarskog sustava, što se izravno odrazilo na razvoj i preoblikovanje prostornih struktura grada. U tom smislu, funkcionalna struktura Osijeka doživjela je značajne promjene, pri čemu se može očekivati nastavak procesa prostorne transformacije u narednim razdobljima [8]. Demografska slika Osječko-baranjske županije, kao i Hrvatske u cjelini, obilježena je sve izraženijim trendovima ukupne i prirodne depopulacije te iseljavanja stanovništva [9]. Uz demografske izazove, važan aspekt predstavlja i starost postojećeg stambenog fonda, koja može utjecati na otpornost zgrada prema različitim prirodnim i okolišnim rizicima. Stambeni fond predstavlja dugoročnu komponentu urbanog razvoja, pri čemu se procjenjuje da je većina zgrada koje će biti u uporabi sredinom 21. stoljeća već izgrađena [10]. Održavanje i obnova postojećeg stambenog fonda, uključujući rekonstrukcije, popravke i tehničke zahvate, predstavljaju značajan segment građevinskog sektora, iako su često manje zastupljeni u javnim i stručnim raspravama u odnosu na novogradnju. U kontekstu održivog razvoja, kvalitete stanovanja i otpornosti urbanih sredina, upravljanje postojećim stambenim fondom ima ključnu ulogu u osiguravanju dugoročne stabilnosti urbanih sustava. Istodobno, visoki troškovi građenja i opći ekonomski uvjeti dodatno utječu na mogućnosti ulaganja u stambeni sektor, što može utjecati na dinamiku razvoja novogradnje i obnove [11].

Kao prostorno i vremenski najpostojaniji element urbane inertnosti, stambeni fond u sebi nosi akumuliranu oštetljivost ovisno o razdoblju i metodama izgradnje. Potresni rizik, definiran kao kombinacija opasnosti i oštetljivosti izloženih elemenata, u Republici Hrvatskoj je u velikoj mjeri određen upravo karakteristikama izgrađenog okoliša. Nedostatak sveobuhvatnih nacionalnih baza podataka o izloženosti zgrada s detaljnim konstrukcijskim karakteristikama predstavlja značajnu prepreku za proaktivno ublažavanje rizika, jer se službeni statistički popisi stanovništva primarno provode u demografske i stambene svrhe na razini stambenih jedinica. Uzimajući u obzir da zgrade izgrađene u posljednjem desetljeću čine tek mali udio u ukupnom stambenom fondu Hrvatske, jasno je da je velik dio postojećeg stambenog fonda izgrađen prije uvođenja suvremenih normi za građenje, što ih čini primarnim izvorom potencijalnih gubitaka u slučaju budućih potresnih događaja.

Rad je strukturiran u dva osnovna dijela. U prvom dijelu prikazana je statistička obrada stambenog fonda i trendova izgradnje, dok je drugi dio posvećen kvalitativnoj procjeni prostornih rizika i njihovim implikacijama za buduće prostorno planiranje i upravljanje razvojem stambenog fonda na području Grada Osijeka.

2. Metodologija istraživanja

Istraživanje se temelji na obradi službenih statističkih podataka Državnog zavoda za statistiku Republike Hrvatske koji se odnose na stambeni fond Grada Osijeka i Osječko-baranjske županije. U radu su upotrijebljeni podaci o završenim stambenim zgradama, novoizgrađenim stanovima, njihovoj korisnoj površini te podaci o nastanjenim stanovima prema godini izgradnje i broju članova kućanstva. Metodološki pristup obuhvaća deskriptivnu statističku obradu kojom se utvrđuju osnovna obilježja i trendovi razvoja stambenog fonda u odabranim vremenskim razdobljima. Rezultati su prikazani tablično i grafički u svrhu lakšeg uočavanja promjena u opsegu i strukturi stambene izgradnje. U

drugom dijelu istraživanja provodi se kvalitativna procjena prostornih rizika s naglaskom na potresni rizik. Procjena se temelji na obradi starosti stambenog fonda kao jednog od pokazatelja potencijalne oštetljivosti zgrada na prirodne i okolišne rizike. Pri tome se polazi od pretpostavke da starije građevine, ovisno o razdoblju gradnje, primijenjenim građevinskim propisima i razini održavanja, mogu pokazivati različit stupanj otpornosti na djelovanje prostornih rizika. Dobiveni rezultati interpretiraju se u kontekstu prostornog planiranja, stambene politike i upravljanja rizicima na području Grada Osijeka i Osječko-baranjske županije.

3. Stambeni fond Grada Osijeka i Osječko-baranjske županije

Obrada stambenog fonda Grada Osijeka temeljena je na podacima o broju stanova, njihovoj površini te broju stanovnika koji u njima žive, uz dodatnu klasifikaciju prema razdoblju izgradnje (Tablica 1). Takav pristup omogućuje uvid u prostornu i vremensku strukturu stambenog fonda te identifikaciju dominantnih razdoblja stambene izgradnje koja su oblikovala današnju urbanu strukturu grada. Poseban naglasak stavlja se na starost stambenih jedinica, budući da ona predstavlja važan pokazatelj tehničkih karakteristika fonda te potencijalne izloženosti različitim prostornim rizicima.

Tablica 1. Stambeni fond Osječko-baranjske županije prema razdoblju izgradnje, broju stanova, površini i broju osoba (izrada autora prema [12])

Razdoblje	Broj stanova	Površina stanova [m^2]	Broj osoba u stanovima
prije 1919.	3.783	285.061	8.113
1919. – 1945.	4.391	349.766	9.488
1946. – 1960.	7.238	551.355	16.368
1961. – 1970.	17.331	1.417.951	41.050
1971. – 1980.	20.789	1.940.728	50.805
1981. – 1990.	18.937	2.077.556	51.511
1991. – 2000.	9.523	1.080.343	27.714
2001. – 2010.	10.755	1.122.326	31.783
2011. -2015.	2.824	297.161	8.672
2016. i kasnije	2.472	282.398	7.749
nepoznato	826	88.880	2.452
Ukupno	98.869	9.493.525	255.705

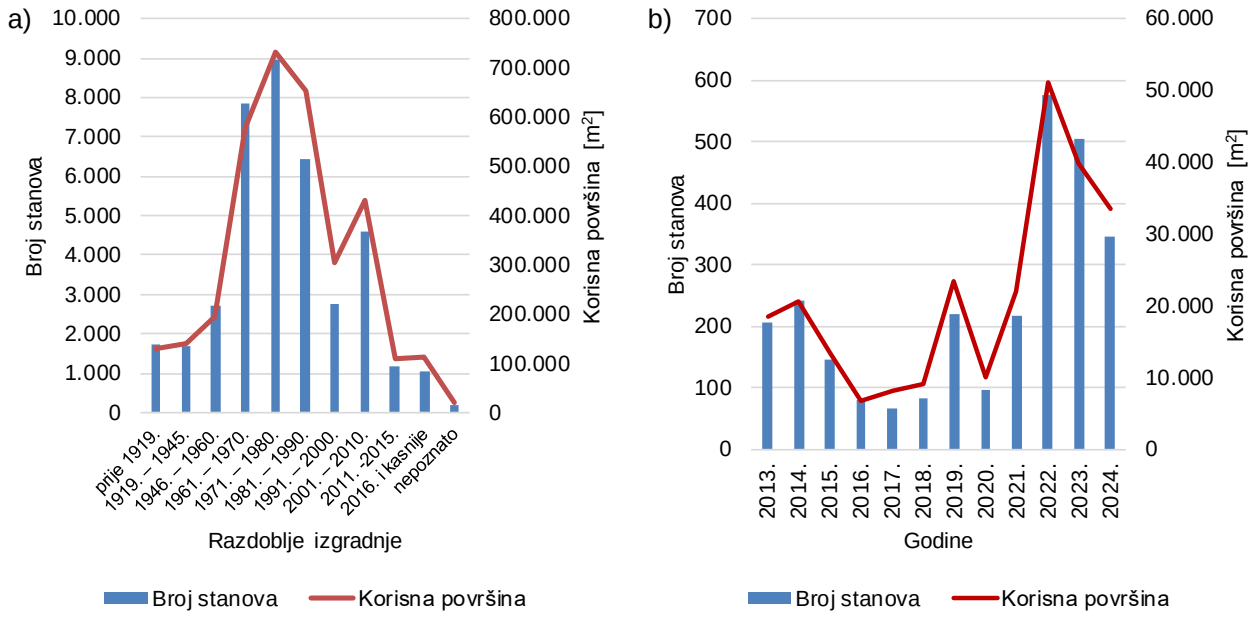
Obrada nastanjenih stanova prema godini izgradnje pokazuje da stambeni fond Osječko-baranjske županije dominantno čine stanovi izgrađeni tijekom druge polovice 20. stoljeća. Najveći broj stanova evidentiran je u razdoblju 1971. – 1980. godine (20.789 stanova), nakon čega slijede stanovi izgrađeni između 1981. i 1990. godine (18.937) te između 1961. i 1970. godine (17.331). U navedenim razdobljima koncentriran je i najveći dio ukupne stambene površine te najveći broj stanovnika. Tako u stanovima izgrađenima između 1981. i 1990. godine živi 51.511 osoba, dok u stanovima iz razdoblja 1971. – 1980. godine živi 50.805 osoba. Ovi podaci potvrđuju da je razdoblje intenzivne urbanizacije i stanogradnje tijekom socijalističkog razdoblja imalo presudnu ulogu u oblikovanju današnjeg stambenog

fonda županije. S druge strane, broj stanova izgrađenih nakon 2011. godine relativno je malen u odnosu na stariji stambeni fond, što upućuje na usporavanje stambene izgradnje u posljednjim desetljećima. Istodobno, značajan udio stanova izgrađenih prije 1960. godine ukazuje na potrebu kontinuiranog ulaganja u obnovu, energetsku učinkovitost i povećanje otpornosti stambenog fonda na različite prostorne i prirodne rizike. U nastavku, Tablicom 2, se prikazuje struktura stambenog fonda Osijeka prema razdobljima izgradnje, uz interpretaciju ključnih trendova u razvoju stanovanja te njihovih implikacija na suvremenu prostornu organizaciju grada.

Tablica 2. Stambeni fond Grada Osijeka prema razdoblju izgradnje, broju stanova, površini i broju osoba (izrada autora prema [12])

Razdoblje	Broj stanova	Površina stanova [m²]	Broj osoba u stanovima
prije 1919.	1.740	129.025	3.785
1919. – 1945.	1.694	140.844	3.759
1946. – 1960.	2.729	194.408	6.004
1961. – 1970.	7.863	578.766	17.786
1971. – 1980.	8.954	732.681	20.862
1981. – 1990.	6.458	652.759	16.789
1991. – 2000.	2.761	304.016	7.495
2001. – 2010.	4.613	431.347	12.165
2011. – 2015.	1.171	110.532	3.213
2016. i kasnije	1.024	112.691	2.971
nepoznato	185	21.634	563
Ukupno	39.192	3.408.703	95.392

Ukupna stambena površina prati sličan obrazac, pri čemu najveći udio površine pripada upravo razdobljima intenzivne izgradnje u drugoj polovici 20. stoljeća. To potvrđuje da je postojeći stambeni fond Osijeka dominantno starije generacije, što ima važne implikacije za njegovu tehničku kvalitetu i energetsku učinkovitost. Promatrano kroz broj korisnika, najveći broj stanovnika također je koncentriran u stambenim jedinicama izgrađenim u razdoblju 1971. – 1980. i 1981. – 1990., što upućuje na dugoročnu stabilnost tih stambenih zona i njihovu i dalje visoku funkcionalnu važnost u strukturi grada. S obzirom na dobnu strukturu stambenog fonda, može se zaključiti da značajan dio stambenih zgrada pripada starijim građevinskim razdobljima, što potencijalno povećava njihovu izloženost fizičkim, tehničkim i prostornim rizicima, posebice u kontekstu zahtjeva suvremenih standarda gradnje. Na Slici 1. prikazana je raspodjela broja stanova prema godini izgradnje, te broj novoizgrađenih stanova i ukupna korisna površina. Dobiveni rezultati ukazuju na izraženu koncentraciju stambenog fonda u zgradama izgrađenima između 1961. i 1990. godine, što potvrđuje dominantnu ulogu razdoblja intenzivne urbanizacije i planske stanogradnje u oblikovanju današnje strukture stambenog fonda Osijeka.



Slika 1. Grafički prikaz: a) broja stanova prema razdoblju izgradnje, te b) broj i ukupna korisna površina novoizgrađenih stanova za Grad Osijek (izrada autora prema [12], [13])

Starost značajnog dijela fonda pritom predstavlja važan čimbenik u procjeni budućih potreba za obnovom, energetskom sanacijom i upravljanjem prostornim rizicima. Tijekom promatranog razdoblja broj novoizgrađenih stanova u Gradu Osijeku kretao se od 67 (2017.) do 577 (2022.), dok je ukupna korisna površina varirala između 6.622 m² i 51.223 m². Nakon pada građevinske aktivnosti u razdoblju 2015. – 2018., od 2019. godine vidljiv je trend oporavka, koji kulminira rekordnom izgradnjom 2022. godine. Unatoč smanjenju broja stanova u 2023. i 2024. godini, razina novogradnje ostala je viša nego u većini godina promatranog razdoblja, što ukazuje na intenziviranje stambene izgradnje u novijem razdoblju. Tijekom promatranog razdoblja najveći udio novogradnje u Gradu Osijeku čine trosobni i četverosobni stanovi. Tako su od 2013. do 2015. dominirali dvosobni stanovi, 2016. godine trosobni, od 2017. do 2022. godine četverosobni, 2023. godine dvosobni te ponovo četverosobni stanovi 2024. godine [13]. Navedeni trendovi ukazuju na istodobnu prisutnost starijeg stambenog fonda i pojačane novogradnje u posljednjim godinama. Takva struktura upućuje na potrebu kontinuiranog ulaganja u obnovu postojećih zgrada, uz istodobno planiranje daljnjeg razvoja stambenog fonda u skladu s načelima održivog urbanog razvoja.

4. Kvalitativna procjena prostornih rizika

Kvalitativna procjena prostornih rizika stambenog fonda Grada Osijeka provedena je s naglaskom na izloženost građevinskog fonda potresnom riziku. Potres predstavlja jedan od značajnijih prirodnih rizika u Republici Hrvatskoj zbog potencijalno velikih materijalnih šteta i dugoročnih posljedica. Budući da detaljni podaci o konstrukcijskim obilježjima svih zgrada nisu dostupni, procjena se temelji na starosti zgrada, razdobljima gradnje te razvoju građevinskih tehnologija i protupotresnih propisa koji su bili na snazi u vrijeme njihove

izgradnje. Godina izgradnje pritom predstavlja jedan od najvažnijih pokazatelja konstrukcijskih karakteristika zgrade te omogućuje procjenu očekivane razine seizmičke otpornosti i potencijalne oštetljivosti građevinskog fonda. Obrada stambenog fonda Grada Osijeka pokazala je da najveći udio stanova pripada razdoblju između 1961. i 1990. godine. Takva starosna struktura u velikoj je mjeri posljedica intenzivne urbanizacije i planske stambene izgradnje tijekom druge polovice 20. stoljeća. Istodobno, navedeno razdoblje obuhvaća nekoliko razvojnih faza hrvatskih protupotresnih propisa, zbog čega se unutar fonda mogu očekivati značajne razlike u razini konstrukcijske sigurnosti.
Na nacionalnoj razini, Republika Hrvatska do sada nije razvila jedinstven model izloženosti stambenog fonda. Napori na opisivanju i klasifikaciji zgrada uglavnom su bili fragmentirani, provođeni kao zasebni akademski projekti ili lokalne inicijative, bez integrirajućeg nacionalnog okvira. Ipak, nekoliko doprinosa oblikovalo je trenutno razumijevanje izloženosti i identificiralo metodološke pristupe primjenjive u hrvatskom kontekstu. U sklopu projekta SERA razvijen je nacionalni model izloženosti stambenog fonda Republike Hrvatske, klasificiran prema GEM Building Taxonomy. Model se temelji na podacima Popisa stanovništva iz 2011. godine te uključuje informacije o materijalu konstrukcije, broju katova, razdoblju gradnje i razini protupotresnog projektiranja. Pri klasifikaciji zgrada uzet je u obzir razvoj protupotresnih propisa u Hrvatskoj, osobito uvođenje normativa 1964. godine i njihova izmjena 1981. godine. Model obuhvaća približno 1,6 milijuna stambenih zgrada i predstavlja temelj za procjenu izloženosti stambenog fonda potresnom riziku [14]. Razumijevanje evolucije protupotresnih propisa nužan je preduvjet za pravilnu interpretaciju podataka o izloženosti. Godina izgradnje zgrade ukazuje na korištene materijale, konstrukcijske sustave i razinu protupotresnog projektiranja te posredno na očekivanu potresnu otpornost. Tablica 3 prikazuje distribuciju zgrada u Republici Hrvatskoj prema sposobnosti prihvata horizontalnih sila, ovisno o razdoblju gradnje.

Tablica 3. Udio zgrada prema kapacitetu prihvata potresnih horizontalnih sila po razdoblju gradnje [15]

Parametar	**do 1945.**	**1946. – 1964.**	**1965. – 1981.**	**1982. – 1997.**	**1998. – 2011.**	**od 2012.**
Prihvat horiz. djelovanja	0 – 5 %	0 – 10 %	30 – 50 %	30 – 50 %	75 – 100 %	~100 %
Stambene jedinice (2011.)	~13 %	~17 %	~35 %	~21 %	~14 %	n/a*

*n/a – nije primjenjivo

Nacionalni građevinski fond Republike Hrvatske može se svrstati u sedam karakterističnih povijesnih razdoblja prema materijalima, metodama gradnje i primijenjenim tehničkim standardima [16]. Svako od tih razdoblja karakteriziraju dominantni materijali, tipični konstrukcijski sustavi i razine potresne projektne otpornosti:

- Austro-Ugarska era (do 1920.): zgrade izgrađene od prirodnih materijala dostupnih na lokalnoj razini, kamena, drva, gline i opeke. Gradnja bez protupotresnih normi, s neznatnom otpornošću na horizontalna djelovanja. U priobalnom dijelu prevladava kameno ziđe, u kontinentalnom dijelu drvena gradnja i opečna zidana gradnja.
- Kraljevina Jugoslavija (1920. – 1948.): postupno uvođenje novih materijala (čelik, armirani beton, staklo), uz kontinuiranu primjenu nearmirane zidane gradnje debljina zidova 25, 38 ili 51 cm. Od oko 1930. u urbanim se sredinama grade armiranobetonske grede i stupovi. Potresna opterećenja se ne uzimaju u obzir; otpornost je vrlo niska.
- Poslijeratna obnova (1948. – 1964.): uvođenje novih, lakših materijala i suvremenijih tehnika gradnje. Povećanje veličine otvora, tanji nosivi zidovi. Potresna opterećenja su u određenoj mjeri uzimana u obzir, ali zgrade ovog razdoblja imaju samo malu potresnu otpornost.
- Rana modernizacija (1964. – 1981.): izravna reakcija na potres u Skopju 1963. godine i donošenje prvih formalnih protupotresnih normativa. Uvođenje omeđenog ziđa s vertikalnim i horizontalnim veznim serklažima. AB konstrukcije projektiraju se s okvirima i zidovima sukladno propisima iz 1964. godine. Ograničena potresna otpornost.
- Nacionalno razdoblje prednorme Eurokoda (1981. – 2005.): donošenje Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju zgrada visokogradnje u potresnim područjima. Uvođenje potresnih karti za povratna razdoblja 50, 100, 200, 500, 1000 i 10 000 godina (1987.), od kojih karta za 500-godišnje povratno razdoblje postaje referentni standard. Primjena pojednostavljenih proračuna. Srednja do visoka potresna otpornost, ovisno o godini projektiranja unutar ovog perioda.
- Prijelaz na Eurokod (2005. – 2012.): postupno usvajanje Eurokod normi, uvođenje HRN ENV 1998-1. Standardizirano protupotresno projektiranje, visoka razina otpornosti za zgrade projektirane u ovom periodu.
- Suvremeno razdoblje (od 2012.): potpuna primjena norme HRN EN 1998-1:2011. Projektna razina otpornosti. Zgrade ovog razdoblja jedine u potpunosti zadovoljavaju suvremene zahtjeve za potresnu otpornost, no čine svega oko 4 % ukupnog fonda.

Kvalitativna procjena potresnog rizika stambenog fonda Grada Osijeka dodatno je potkrijepljena rezultatima ranijih istraživanja provedenih na području grada. Procjene potresne oštetljivosti različitih urbanih cjelina Osijeka pokazale su da značajan udio građevinskog fonda čine nearmirane zidane zgrade. Posebno su oštetljive zgrade s fleksibilnim međukatnim konstrukcijama i nedovoljnom povezanošću zidova i stropnih konstrukcija, što povećava mogućnost pojave izvanravninskih mehanizama sloma i većih stupnjeva oštećenja pri potresnom djelovanju. Budući da najveći dio stambenog fonda Osijeka pripada razdoblju između 1961. i 1990. godine, može se pretpostaviti da značajan udio građevina potječe iz vremena prijelaza između različitih generacija protupotresnih propisa. Takva struktura upućuje na heterogenu razinu potresne otpornosti fonda te na potrebu detaljnijih istraživanja konstrukcijskih karakteristika pojedinih tipologija zgrada. Dosadašnja istraživanja potresne oštetljivosti na području Osijeka pokazuju da najveći

stupanj oštetljivosti imaju starije zidane građevine, osobito one s fleksibilnim međukatnim konstrukcijama, dok armiranobetonske konstrukcije pokazuju povoljnije ponašanje pri djelovanju potresa [17]–[19]. Procjene provedene na reprezentativnim urbanim cjelinama grada potvrđuju da su nearmirane zidane građevine najosjetljiviji segment građevinskog fonda te da njihova zastupljenost značajno utječe na ukupnu razinu potresnog rizika. Stoga se može zaključiti da prostorni rizik stambenog fonda Grada Osijeka prvenstveno proizlazi iz velike zastupljenosti starijih građevina izgrađenih tijekom druge polovice 20. stoljeća.

5. Zaključak

Provedena statistička obrada pokazala je da stambeni fond Grada Osijeka i Osječko-baranjske županije dominantno potječe iz razdoblja 1961 .– 1990. godine, kada je intenzivna urbanizacija i planska stanogradnja oblikovala današnju stambenu strukturu. Velik dio fonda izgrađen je prije uvođenja suvremenih protupotresnih normi, što ukazuje na njegovu povećanu izloženost prostornim, prvenstveno potresnim, rizicima. Podaci o novogradnji pokazuju usporavanje izgradnje u odnosu na stariji fond, uz vidljiv oporavak građevinske aktivnosti nakon 2018. godine i rekordnu izgradnju 2022. godine. Kvalitativna procjena prostornih rizika, provedena s naglaskom na potresni rizik, potvrdila je da starost zgrada predstavlja jedan od ključnih pokazatelja njihove konstrukcijske sigurnosti. Budući da najveći udio stambenog fonda Osijeka pripada razdobljima koja obuhvaćaju nekoliko generacija protupotresnih propisa, unutar fonda se mogu očekivati značajne razlike u razini potresne otpornosti, pri čemu su nearmirane zidane građevine, osobito one s fleksibilnim međukatnim konstrukcijama, identificirane kao najoštetljiviji segment fonda. Dobiveni rezultati imaju izravne implikacije za prostorno planiranje, stambenu politiku i upravljanje rizicima na razini Grada Osijeka i Osječko-baranjske županije. Naglašena starost velikog dijela stambenog fonda upućuje na potrebu kontinuiranog ulaganja u obnovu, energetsku učinkovitost i povećanje potresne otpornosti postojećih zgrada, dok istodobni trend novogradnje zahtijeva usklađeno planiranje budućeg razvoja u skladu s demografskim potrebama stanovništva i načelima održivog urbanog razvoja. Nedostatak sveobuhvatne nacionalne baze podataka o konstrukcijskim karakteristikama zgrada ostaje značajno ograničenje za procjenu izloženosti, te ukazuje na potrebu daljnjih istraživanja usmjerenih na detaljniju klasifikaciju i procjenu otpornosti stambenog fonda na razini grada i županije.

6. Literatura

[1] United Nations. 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN, 2026. [Online]. Dostupno na: https://www.un.org/uk/desa/68-world-population-projected-live-urban-areas-2050-says-un. (Pristupljeno 16.06.2026.)

[2] Takano, Tsuyoshi i sur. Evaluating the quality of life for sustainable urban development // *Cities*, 142 (2023), 104561. (ISSN 1873-6084)

[3] Kalyukin, Alexander; Kohl, Sebastian. Continuities and discontinuities of Russian urban housing: The Soviet housing experiment in historical long-term perspective // *Urban Studies*, 57 (2020), 8; 1768–1785. (ISSN 1360-063X)

[4] Garha, Nachatter Singh; Azevedo, Alda Botelho. Demography and Housing: Challenges and opportunities for Lisbon's housing prospects from 2022 to 2051 // *Cities*, 158 (2025), 105665. (ISSN 1873-6084)

[5] Ibem, Eziyi O.; Amole, Dolapo. Residential Satisfaction in Public Core Housing in Abeokuta, Ogun State, Nigeria // *Social Indicators Research*, 113 (2013), 1; 563–581. (ISSN 1573-0921)

[6] Brkanić Mihić, Ivana. Housing Quality Assessment Model Based on the Spatial Characteristics of an Apartment, *Buildings*, 13 (2023), 9; 2181. (ISSN 2075-5309)

[7] Haddad, Mwfeq; Judeh, Mahfuz; Haddad, Shafig. Factors Affecting Buying Behavior of an Apartment an Empirical Investigation in Amman, Jordan // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology,* 3 (2011), 3; 234–239. (ISSN 2040-7467)

[8] Njegač, Dražen; Gašparović, Slaven; Stipešević, Zvonimir. The Changes in the Functional and Spatial Structure of Osijek after 1991 // *Hrvatski geografski glasnik/Croatian Geographical Bulletin,* 72 (2011), 02; 101–118. (ISSN 1848-6401)

[9] Jukić, Marijan; Turk, Ivo. Dinamičke demografske determinante ruralno-urbane polarizacije Osječko-baranjske županije (1971.–2001.) // *Društvena istraživanja: Journal for General Social Issues,* 19 (2010), 6; 1139–1162 (ISSN 1848-6096)

[10] United Nations Environment Programme, SBCI. Buildings and Climate Change, Summary for Decision makers, 2009.

[11] Obradović, Dino. Novogradnja i održavanje postojećeg stambenog fonda u Republici Hrvatskoj // *PLIN 2025 - Zbornik radova 16. međunarodnog skupa o prirodnom plinu, toplini i vodi* / Raos, Pero i sur. (ur.). (ISSN 1849-0638). Slavonski Brod: Sveučilište u Slavonskom Brodu, 24.09.-26.09.2026., 164–173.

[12] Državni zavod za statistiku, Nastanjeni stanovi prema godini izgradnje, površini i broju osoba u stanu, popis 2021., Zagreb, 2026.

[13] Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, Tabela 2.2. Stambena gradnja po gradovima/općinama-Osijek, 2026. [Online]. Dostupno na: https://web.dzs.hr/PxWeb/sq/c53db3b7-8186-4602-946e-eb6afa56bd9a. (Pristupljeno 17.06.2026.).

[14] Crowley, Helen; Silva, Viktor; Despotaki, Venetia i sur. European Seismic Risk Model 2020: Focus on Croatia // *Future Trends in Civil Engineering* / Mandić Ivanković, Ana; Lakušić, Stjepan (ur.). (ISBN 978-953-8168-36-9). Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 17.10.2019., 53–70.

[15] Republika Hrvatska, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Long-term Renovation Strategy of the National Building Stock by 2050, Zagreb, 2020.

[16] Pavić, Gordana. Unaprjeđenje metodologije procjene potresnog rizika za zgrade, doktorski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2023.

[17] Pavić, Gordana; Hadzima-Nyarko, Marijana; Bulajić, Borko; Jurković, Željka. Development of Seismic Vulnerability and Exposure Models-A Case Study of Croatia, // *Sustainability*, 12 (2020), 3; 973. (ISSN 2071-1050)

[18] Radić, Josip; Işik, Ercan; Hadzima-Nyarko, Marijana. Evaluation of Different Rapid Assessment Approaches for Seismic Risk Evaluation of Masonry Structures // *Civil Engineering Journal,* 11 (2025), 10; 3981–4005 (ISSN 2476-3055)

[19] Radić, Josip; Ereš, Antonija; Vidaković, Držislav; Hadzima-Nyarko, Marijana. Assessment of Building Vulnerability Through Rapid Visual Screening Method: Case Study of Selected Street Blocks in Osijek // *Proceedings of the 7th International scientific conference Conference on mechanical engineering technologies and applications* / Sarajevo: University of East Sarajevo: Faculty of Mechanical Engineering East Sarajevo, 2024, 536–542.

Razvoj metodološkog okvira za vrednovanje održivosti građevinskih materijala kroz životni ciklus
Development of a Methodological Framework for Assessing the Sustainability of Construction Materials Throughout Their Life Cycle

M. Domazetović[1], D. Obradović[1,*], H. Krstić[1]

[1]Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: dobradovic@gfos.hr

Sažetak
Razvoj održivih građevinskih materijala i tehnologija predstavlja jedan od ključnih izazova suvremenog građevinskog sektora u kontekstu smanjenja okolišnih utjecaja i postizanja ciljeva dekarbonizacije. U tom smislu, metode analize životnog ciklusa (LCA) i troškova životnog ciklusa (LCC) omogućuju cjelovitu procjenu ekoloških i ekonomskih aspekata građevinskih rješenja kroz sve faze njihova životnog ciklusa, od eksploatacije sirovina i proizvodnje do uporabe, recikliranja i ponovne uporabe materijala. U radu se razmatra razvoj metodološkog okvira za vrednovanje održivosti građevinskih materijala s naglaskom na primjenu inovativnih materijala temeljenih na sekundarnim sirovinama i biološki obnovljivim izvorima. Prikazana je analiza i usporedba mehaničkih i toplinskih svojstava inovativnih građevinskih materijala u odnosu na konvencionalne građevinske materijale, kao i mogućnost njihove primjene u građevinarstvu. Naglasak je stavljen na povezivanje LCA i LCC metoda radi cjelovitije procjene okolišnih i ekonomskih aspekata građevinskih materijala. Očekuje se da rezultati istraživanja doprinesu razvoju kružno usmjerene i klimatski odgovorne gradnje, unapređenju metodologija za procjenu održivosti građevinskih materijala i tehnologija, smanjenju građevinskog otpada i dekarbonizaciji građevinskog sektora.

Ključne riječi: analiza životnog ciklusa (LCA), inovativni građevinski materijali**,** kružno gospodarstvo, održiva gradnja, reciklirani materijali, troškovi životnog ciklusa (LCC)

Abstract
The development of sustainable construction materials and technologies represents one of the key challenges of the contemporary construction sector in the context of reducing environmental impacts and achieving decarbonization targets. In this regard, Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC) methods enable a comprehensive evaluation of the environmental and economic aspects of construction solutions throughout all stages of their life cycle, from raw material extraction and production to use, recycling,

and material reuse. This paper examines the development of a methodological framework for assessing the sustainability of construction materials, with a particular focus on the application of innovative materials based on secondary raw materials and bio-based renewable resources. An analysis and comparison of the mechanical and thermal properties of innovative construction materials with conventional construction materials are presented, as well as an examination of their potential application in construction. Emphasis is placed on linking LCA and LCC methods in order to provide a more comprehensive assessment of the environmental and economic aspects of construction materials. The expected results of the research contribute to the development of circular and climate-responsible construction, the improvement of methodologies for assessing the sustainability of construction materials and technologies, the reduction of construction waste, and the decarbonization of the construction sector.

Key words: Life Cycle Assessment (LCA), innovative construction materials, circular economy, sustainable construction, recycled materials, Life Cycle Costing (LCC)

1. Uvod

Građevinski sektor jedan je od najvećih potrošača prirodnih resursa te značajan izvor emisija stakleničkih plinova i građevinskog otpada. Procjenjuje se da zgrade tijekom svojega životnog ciklusa sudjeluju s više od 40 % u ukupnoj potrošnji energije [1- 3], dok proizvodnja građevinskih materijala i izvođenje građevinskih radova imaju značajan utjecaj na okoliš kroz potrošnju sirovina, energije i emisije ugljikova dioksida [4]. U kontekstu europskih i globalnih ciljeva dekarbonizacije te prijelaza prema kružnom gospodarstvu, održivost građevinskih materijala i tehnologija postaje jedno od ključnih područja istraživanja suvremenog građevinarstva [5].

Tradicionalni pristupi odabiru građevinskih materijala uglavnom se temelje na tehničkim i ekonomskim kriterijima, dok se okolišni aspekti često razmatraju zasebno ili tek u završnim fazama projektiranja. Takav pristup ne omogućuje cjelovitu procjenu stvarnih učinaka građevinskih proizvoda tijekom njihova životnog ciklusa [6-8]. Zbog toga se sve više primjenjuju metode analize životnog ciklusa (engl. Life Cycle Assessment, LCA) i troškova životnog ciklusa (engl. Life Cycle Costing, LCC), koje omogućuju sustavno vrednovanje okolišnih i ekonomskih aspekata građevinskih materijala od faze ekstrakcije sirovina i proizvodnje, preko uporabe i održavanja, do ponovne uporabe, recikliranja i konačnog zbrinjavanja [6-9].

Posljednjih godina poseban interes istraživačke zajednice usmjeren je prema razvoju građevinskih materijala temeljenih na sekundarnim sirovinama i obnovljivim izvorima [10,11]. Primjena recikliranih građevinskih materijala doprinosi smanjenju količine građevinskog otpada, očuvanju prirodnih resursa i smanjenju okolišnog opterećenja zamjenom primarnih sirovina, dok materijali biološkog podrijetla omogućuju smanjenje ugljičnog otiska zahvaljujući obnovljivosti sirovina i mogućnosti privremenog skladištenja ugljika tijekom rasta biomase [10,11]. Međutim, za njihovu širu primjenu potrebno je osigurati pouzdanu procjenu tehničkih, okolišnih i ekonomskih svojstava te mogućnosti njihove integracije u postojeće građevinske sustave i normativne okvire [12].

U tom kontekstu Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek provodi projekt LCA-ECO, čiji je cilj razvoj znanstveno utemeljenog metodološkog okvira za procjenu ekološke i ekonomske održivosti građevinskih materijala i tehnologija primjenom LCA i LCC metoda. Projekt uključuje razvoj i eksperimentalno vrednovanje triju inovativnih građevinskih materijala. Njihova svojstva analiziraju se na razini materijala i konstrukcija, uz primjenu eksperimentalnih istraživanja, numeričkog modeliranja te procjene okolišnih i ekonomskih učinaka tijekom životnog ciklusa. Posebna inovativnost projekta ogleda se u integraciji naprednih metoda analize podataka temeljenih na neuronskim mrežama, koje omogućuju obradu složenih okolišnih baza podataka, smanjenje nesigurnosti rezultata te identifikaciju ključnih čimbenika koji utječu na održivost građevinskih materijala. Takav pristup omogućuje razvoj sveobuhvatnog sustava za donošenje odluka koji povezuje tehničke, okolišne i ekonomske kriterije.
Cilj ovoga rada jest prikazati razvoj metodološkog okvira za vrednovanje održivosti građevinskih materijala kroz životni ciklus, s posebnim naglaskom na integraciju LCA i LCC metoda te njihovu primjenu u procjeni inovativnih građevinskih materijala.

2. Metode analize životnog ciklusa (LCA) i troškova životnog ciklusa (LCC)

Rastuća potreba za smanjenjem negativnih učinaka građevinskog sektora na okoliš potaknula je razvoj i široku primjenu sustavnih analitičkih alata koji omogućuju cjelovito vrednovanje građevinskih materijala i tehnologija kroz sve faze njihova postojanja. Među njima posebno mjesto zauzimaju analiza životnog ciklusa (LCA) i analiza troškova životnog ciklusa (LCC), koje zajedno pružaju integrirani uvid u okolišne i ekonomske aspekte građevinskih rješenja. LCA je standardizirana metodologija definirana normama ISO 14040 i ISO 14044 [6,7], koja se temelji na četiri međusobno povezane faze: definiranju cilja i opsega, izradi inventara životnog ciklusa (engl. Life Cycle Inventory, LCI), procjeni utjecaja životnog ciklusa (engl. Life Cycle Impact Assessment, LCIA) i interpretaciji rezultata. Primjenom ove metodologije moguće je pratiti i kvantificirati okolišna opterećenja koja nastaju od trenutka ekstrakcije sirovina iz prirode, kroz procese proizvodnje, transporta i ugradnje, sve do kraja korisnog vijeka materijala ili proizvoda, uključujući faze ponovne uporabe, recikliranja i konačnog zbrinjavanja. U kontekstu građevinskog sektora, primjena LCA metodologije uređena je normom EN 15804 [8], koja definira pravila za izradu okolišnih deklaracija proizvoda (engl. Environmental Product Declaration, EPD) i strukturira faze životnog ciklusa građevinskih proizvoda od A1 do D, omogućujući usporedivost rezultata između različitih studija i proizvoda. Pritom istraživanja upozoravaju da faza transporta može predstavljati značajan udio ukupnih emisija CO_2 i potrošnje resursa, što se često zanemaruje u LCA studijama [13]. Kategorije utjecaja koje se najčešće razmatraju u LCA studijama građevinskih materijala uključuju potencijal globalnog zagrijavanja (engl. Global Warming Potential, GWP), iscrpljenje abiotskih resursa, zakiseljavanje, eutrofikaciju, fotokemijsko stvaranje ozona te potrošnju primarne energije [7,8]. Rezultati LCA analiza pokazuju da faza proizvodnje građevinskih materijala i osobito transport mogu značajno doprinijeti ukupnom okolišnom opterećenju, pri čemu se njihov utjecaj razlikuje ovisno o vrsti materijala i udaljenosti transporta [13]. LCC metodologija komplementarna je LCA pristupu jer uzima u obzir sve financijske aspekte vezane uz građevinu ili materijal kroz cijelo njegovo

trajanje, od početnih troškova nabave i ugradnje, preko troškova redovitog i izvanrednog održavanja, sve do troškova konačnog uklanjanja i zbrinjavanja. Norma ISO 15686-5 [9] definira okvir za primjenu LCC u građevinarstvu i naglašava važnost dugoročne perspektive pri donošenju projektantskih i investicijskih odluka. Istraživanja pokazuju da operativni troškovi često višestruko nadmašuju inicijalne građevinske troškove, zbog čega je njihovo predviđanje i optimizacija ključna za donošenje kvalitetnih investicijskih odluka [14]. U istraživačkoj zajednici sve je veći konsenzus da LCA i LCC ne bi trebale biti primjenjivane izolirano, budući da svaka metoda zasebno pruža samo parcijalni uvid u stvarnu održivost nekog rješenja [15]. Integrirani LCA-LCC pristupi omogućuju istovremeno sagledavanje okolišnih i ekonomskih dimenzija, što je posebno važno pri usporedbi alternativnih tehničkih rješenja s različitim profilima troškova i emisija.

Hou i sur. [15] razvili su integrirani LCA-LCC model za vrednovanje tehničkih rješenja u prometnoj infrastrukturi koji uključuje višedimenzionalni sustav pokazatelja obuhvaćajući zagađenje zraka, buke i otpada, energetsku potrošnju te sve relevantne projektne troškove. Slični pristupi primjenjuju se i u kontekstu reciklaže građevinskog otpada - Wang i sur. [10] koristili su LCA za usporedbu okolišnih i ekonomskih koristi recikliranja građevnog otpada, dok Barrau i sur. [16] analiziraju tehničke i okolišne aspekte različitih tehnologija reciklaže betona, ističući mogućnosti smanjenja emisija kroz zamjenu primarnih sirovina.

Unatoč značajnom napretku u razvoju LCA i LCC metodologija, njihova primjena u građevinarstvu i dalje je povezana s određenim izazovima. Dostupnost pouzdanih podataka o trajnosti materijala, troškovima održavanja i scenarijima završetka životnog vijeka proizvoda još je uvijek ograničena, što može utjecati na pouzdanost rezultata LCC analiza [14,15]. Istodobno, kvaliteta rezultata LCA analiza uvelike ovisi o dostupnosti reprezentativnih podataka za pojedine faze životnog ciklusa, pri čemu transport i scenariji recikliranja mogu imati značajan utjecaj na ukupni okolišni profil građevinskih materijala [10,13,16].

3. Toplinskoizolacijski materijali od biomase i usporedba s konvencionalnim materijalima

Materijali biljnog podrijetla, poput slame, konopljine i drvenih vlakana, sve se češće razmatraju kao održiva alternativa konvencionalnim izolacijskim materijalima u građevinskim primjenama [11]. Primarna tehnička prednost materijala od biomase leži u niskoj toplinskoj vodljivosti, koja se za drvena vlakna kreće u rasponu od 0,038 do 0,050 W/(m·K) [17], što je usporedivo s konvencionalnim izolacijskim materijalima. Za kontekstualizaciju ovih vrijednosti, Krstić i sur. [18] analizirali su toplinska i ekonomska svojstva trenutno najzastupljenijih izolacijskih materijala - ekspandiranog polistirena (EPS-a) i mineralne vune (MW) u debljini od 15 cm, pri čemu oba materijala postižu jednaku toplinsku vodljivost od λ = 0,037 W/(m·K).

Unatoč jednakim toplinskim performansama, materijali se znatno razlikuju po gustoći - EPS iznosi 21 kg/m³, a MW 110 kg/m³ - što izravno utječe na ugljični otisak i troškove [18]. S aspekta troškova životnog ciklusa, ukupni LCC za EPS iznosi 107,30 €/m², dok je za MW 127,85 €/m², što znači da je MW skuplja opcija za oko 19 % [18]. Ugljični otisak EPS-a iznosi

13,25 kg CO_2-ekv./m², a MW 15,18 kg CO_2-ekv./m² [18]. Usporedba ključnih svojstava konvencionalnih i ekoloških izolacijskih materijala prikazana je u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba svojstava izolacijskih materijala

Svojstvo	EPS	Mineralna vuna	Drvena vlakna	Slama
Toplinska vodljivost λ [W/m·K]	0,037	0,037	0,038 – 0,050 [17]	0,052 – 0,080 [19]
Gustoća [kg/m³]	21	110	50 – 270	80 – 130
Ugljični otisak [kg CO_2-ekv./kg]	4,21	0,92	negativan*	negativan*
Reakcija na požar	B1	A1	E – D	E
Higroskopnost	niska	srednja	visoka	visoka
Lokalna dostupnost sirovina	niska	srednja	visoka	visoka

*Ekološki materijali vežu CO_2 tijekom rasta biljke, što može rezultirati negativnim ugljičnim otiskom u fazama proizvodnje [11,19].

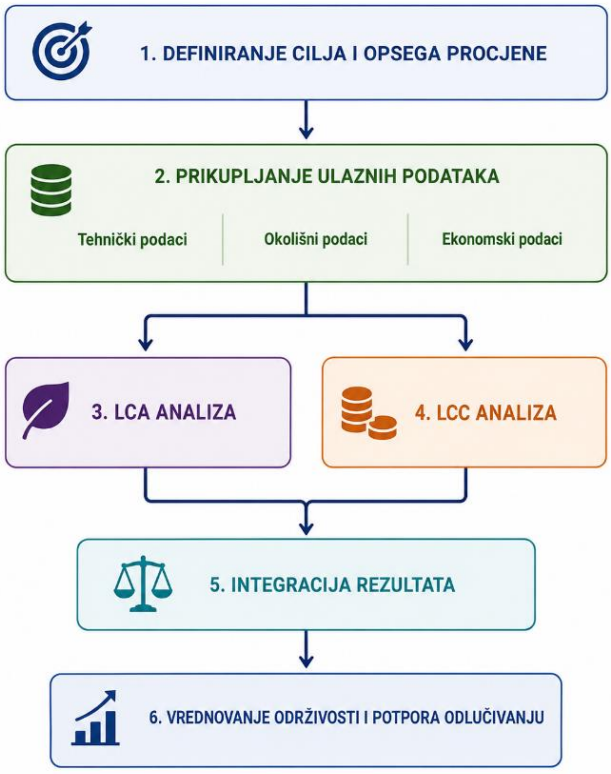
Ključna okolišna prednost ekoloških materijala u odnosu na EPS i MW jest upravo sposobnost vezanja atmosferskog CO_2 tijekom rasta biljke, što može rezultirati negativnim potencijalom globalnog zagrijavanja u fazama A1 - A3 životnog ciklusa [11]. Lokalna dostupnost sirovina dodatno smanjuje emisije povezane s transportom [13,19]. Međutim, ekološki materijali suočavaju se s izazovima vezanim uz osjetljivost na vlagu, nižu požarnu otpornost i nedovoljno razvijene normativne okvire, što trenutno ograničava njihovu širu primjenu [11,17]. Dok su troškovi životnog ciklusa EPS-a i MW detaljno dokumentirani, usporedivi LCC podaci za ekološke materijale još su uvijek ograničeni [11], što upućuje na potrebu za daljnjim istraživanjima i proširenjem dostupne baze podataka u ovom području.

4. Konceptualni metodološki okvir za vrednovanje održivosti građevinskih materijala

Razvoj metodološkog okvira za vrednovanje održivosti građevinskih materijala temelji se na integraciji tehničkih, okolišnih i ekonomskih pokazatelja unutar jedinstvenog sustava procjene. Cilj takvog pristupa jest omogućiti usporedivo i transparentno vrednovanje različitih materijala tijekom cijelog njihovog životnog ciklusa te pružiti podršku pri donošenju odluka u projektiranju i odabiru građevinskih rješenja.

Predloženi okvir sastoji se od šest međusobno povezanih koraka. U prvom koraku definiraju se funkcionalna jedinica i granice sustava. Funkcionalna jedinica predstavlja referentnu osnovu za usporedbu različitih materijala, primjerice 1 m² toplinskoizolacijskog sloja koji zadovoljava propisane toplinske zahtjeve. Granice sustava obuhvaćaju faze životnog ciklusa definirane normom EN 15804 [8], od proizvodnje sirovina do kraja životnog vijeka proizvoda. Drugi korak odnosi se na prikupljanje tehničkih podataka o materijalima. U ovoj fazi analiziraju se relevantna svojstva poput toplinske vodljivosti, gustoće, mehaničke

otpornosti, trajnosti, ponašanja pri požaru i higrotermalnih karakteristika. Navedeni pokazatelji omogućuju procjenu prikladnosti materijala za određenu građevinsku primjenu. Treći korak obuhvaća procjenu okolišnih učinaka primjenom LCA metodologije. Analiziraju se pokazatelji kao što su potencijal globalnog zagrijavanja, potrošnja primarne energije, iscrpljenje resursa te mogućnosti recikliranja i ponovne uporabe materijala. Time se dobiva uvid u ukupni okolišni profil svakog promatranog rješenja.
Četvrti korak odnosi se na ekonomsku procjenu primjenom LCC metodologije. U obzir se uzimaju početni troškovi nabave i ugradnje, troškovi održavanja tijekom uporabe, eventualni troškovi zamjene te troškovi zbrinjavanja ili recikliranja na kraju životnog vijeka. U završnom koraku provodi se integracija tehničkih, okolišnih i ekonomskih pokazatelja. Rezultati pojedinačnih analiza objedinjavanjem u zajednički sustav vrednovanja omogućuju usporedbu različitih materijala i identifikaciju rješenja koja ostvaruju najbolju ravnotežu između tehničke učinkovitosti, okolišne prihvatljivosti i ekonomske opravdanosti. Takav pristup predstavlja temelj za razvoj sustava potpore odlučivanju u području održive gradnje te može poslužiti kao osnova za buduće primjene naprednih metoda analize podataka i umjetne inteligencije. Predloženi metodološki okvir konceptualno je usklađen s načelima suvremenih sustava certificiranja održive gradnje, a prikazan je na slici 1.



Slika 1. Konceptualni metodološki okvir za vrednovanje održivosti građevinskih materijala kroz životni ciklus (izrada autora)

5. Zaključak

Održivost građevinskih materijala postaje jedno od ključnih pitanja suvremenog građevinarstva u kontekstu smanjenja emisija stakleničkih plinova, učinkovitijeg korištenja resursa i prijelaza prema kružnom gospodarstvu. U takvim okolnostima nužno je primjenjivati metode koje omogućuju cjelovito vrednovanje tehničkih, okolišnih i ekonomskih aspekata građevinskih proizvoda tijekom cijelog njihovog životnog ciklusa.

U radu je prikazan konceptualni metodološki okvir za procjenu održivosti građevinskih materijala temeljen na integraciji metoda analize životnog ciklusa (LCA) i troškova životnog ciklusa (LCC). Predloženi pristup omogućuje objedinjavanje tehničkih svojstava materijala s okolišnim i ekonomskim pokazateljima te pruža osnovu za transparentnu usporedbu različitih građevinskih rješenja. Poseban naglasak stavljen je na potencijal primjene materijala proizvedenih od biomase i alternativnih sirovina, koji mogu doprinijeti smanjenju okolišnog opterećenja građevinskog sektora.

Pregled dostupne literature pokazuje da ekološki materijali posjeduju značajan potencijal za smanjenje ugljičnog otiska zahvaljujući mogućnosti pohrane ugljika tijekom rasta biljaka i korištenju lokalno dostupnih sirovina. Istodobno, uočena je ograničena dostupnost usporedivih podataka o njihovim troškovima životnog ciklusa, što predstavlja jedno od važnih područja budućih istraživanja.

Predloženi metodološki okvir predstavlja polazište za sustavno vrednovanje inovativnih građevinskih materijala razvijanih u okviru projekta LCA-ECO. Njegova daljnja primjena i nadogradnja trebala bi omogućiti razvoj pouzdanih alata za potporu odlučivanju te doprinijeti razvoju održivijih građevinskih tehnologija, smanjenju građevinskog otpada i ostvarivanju ciljeva dekarbonizacije građevinskog sektora.

Acknowledgements

This research was funded by the European Union – NextGenerationEU through the project Scientific Framework for Environmentally Sustainable Construction Technologies, Materials, and Structures (581-UNIOS-72).

6. Literatura

[1] Pérez-Lombard, Luis; Ortiz, José; Pout, Christine. A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings*, 40 (2008), 3; 394–398. (ISSN 0378-7788)

[2] Cao, Xiaodong; Dai, Xilei; Liu, Junjie. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade // *Energy and Buildings*, 128 (2016); 198–213. (ISSN 0378-7788)

[3] D'Agostino, Delia; Cuniberti, Barbara; Bertoldi, Paolo. Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings // *Energy and Buildings*, 153 (2017); 72–86. (ISSN 0378-7788)

[4] Barbosa Júnior, Isaias de Oliveira; Macêdo, Alcebíades Negrão; Martins, Vitor William Batista. Construction industry and its contributions to achieving the SDGs proposed by the UN: An analysis of sustainable practices // *Buildings*, 13 (2023), 5; 1168. (ISSN 2075-5309)

[5] European Commission. A New Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
[6] ISO 14040:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
[7] ISO 14044:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
[8] EN 15804:2012+A2:2019. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2019.
[9] ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 5: Life-cycle costing. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
[10] Wang, Yulin; Mu, Xianzhong; Hu, Guangwen; Wang, Liyuchen; Zhu, Xueting. Life cycle assessment-based analysis of environmental and economic benefits in construction solid waste recycling // *Sustainability*, 17 (2025), 9; 3872. (ISSN 2071-1050)
[11] Ye, Fengyang; Wei, Hanlin; Xiao, Yan; Berardi, Umberto; Quaranta, Giuseppe; Demartino, Cristoforo. Bio-based insulation materials in sustainable constructions: A review of environmental, thermal and acoustic insulation, durability, and mechanical performances // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2025). (ISSN 1364-0321)
[12] Affan, Houssam; El Haddaji, Badreddine; Ajouguim, Soukaina; Khadraoui, Fouzia. A Review-Durability, Mechanical and Hygrothermal Behavior of Building Materials Incorporating Biomass // *Eng*, 5 (2024), 2; 992-1027. (ISSN 2673-4117)
[13] Eštoková, Adriana; Fabianová, Martina; Radačovský, Marek. Life cycle assessment and environmental impacts of building materials: Evaluating transport-related factors // *Engineering Proceedings*, 57 (2023), 1, 5. (ISSN 2673-4591)
[14] Biolek, Vojtěch; Hanák, Tomáš. LCC estimation model: A construction material perspective // *Buildings*, 9 (2019), 8; 182. (ISSN 2075-5309)
[15] Hou, Yunfei; Qian, Xiaojing; Zhang, Rui; Gu, Fan; Feng, Peng. Study on an Integrated LCA-LCC Model for Assessment of Highway Engineering Technical Schemes // *Buildings*, 12 (2022), 7; 1050. (ISSN 2075-5309)
[16] Barrau, Enora; Aissani, Lynda; Thiriet, Pierre; Laforest, Valérie; Tanguy, Audrey. Life Cycle Assessment of Concrete Recycling Solutions in Light of Their Technical Complexity // *Recycling*, 10 (2025), 1; 28. (ISSN 2313-4321)
[17] Mazur, Kamila Ewelina; Wardal, Witold Jan; Barwicki, Jan; Tseyko, Mikhail. Thermal Insulation of Agricultural Buildings Using Different Biomass Materials // *Energies*, 18 (2025), 3; 636. (ISSN 1996-1073)
[18] Krstić, Hrvoje; Obradović, Dino; Domazetović, Mihaela; Gradištanac, Kristijan. Life Cycle Costs of Thermal Insulation Materials: A Case Study of Expanded Polystyrene and Mineral Wool // Proceedings of CESBP 2025 – 6th Central European Symposium on Building Physics / Nagy, B.; Szalay, Z. (ur.). Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 796. Cham: Springer, 2026.
[19] Sun, Cheng; Gu, Jian; Dong, Qi; Qu, Dagang; Chang, Wenshao; Yin, Xunzhi. Are straw bales better insulation materials for constructions? A review // *Developments in the Built Environment,* 15 (2023). (ISSN 2666-1659)

Obveze i mogućnosti vođenja digitalne gradilišne dokumentacije
Obligations and Possibilities in the Management of Digital Construction Site Documentation

D. Vidaković[1,*], J. Bošnjak[2], D. Hećimović[3], K. Pavelić[1]

[1]Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J. J. Strossmayera, Osijek, Hrvatska
[2]Impala klesarstvo d.o.o., Borovo, Hrvatska
[3]Hrvatska komora inženjera građevinarstva, ovlašteni inženjer, Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: dvidak@gfos.hr

Sažetak
Dokumentacija kojom se izvođač bavi na gradilišu vrlo je obimna i povezuje sve sudionike u gradnji. Ona je višesvrhovita i izuzetno važna za upravljanje realizacijom građevinskih projekata. U 21. stoljeću sve je izraženija potreba za transformacijom tradicijskog vođenja gradilišne dokumentacije i sve su veće mogućnosti digitalne tehnologije. Pregledom literature sagledane su slabosti papirnate i druge fragmentirane dokumentacije i objašnjene su prednosti koje omogućava vođenje digitalne dokumentacije s platformom za centraliziranu pohranu u oblaku uz dodatne, kompatibilne alate. U članku je pokazan proces unaprjeđenja sustava vođenja gradilišne dokumentacije, uzimajući u obzir društvene i tehničke prepreke koje to u praksi često otežavaju.

Ključne riječi: gradilišna dokumentacija, propisi, digitalni alati, prepreke, unaprjeđenje

Abstract
The documentation that the contractor deals with on the construction site is very extensive and connects all participants in the construction. It serves for several purposes and extremely important for managing the implementation of construction projects. In the 21st century, there is an increasing need to transform traditional construction site documentation management practices, while the opportunities provided by digital technologies are increasing. Based on a review of the relevant literature, the weaknesses of paper-based and other fragmented documentation systems are identified, and the advantages of digital documentation management with a cloud-based centralized storage platform integrated with compatible digital tools are explained. The article presents a process for improving the construction site documentation management system, taking into account the social and technical barriers that often often make it difficult in practice.

Key words: construction site documentation, regulations, digital tools, obstacles, improvement.

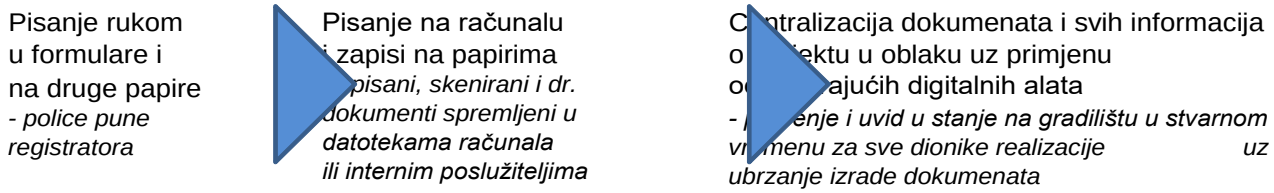
1. Uvod – važnost dokumentacije pri izvedbi građevinskog projekta

Građevinski projekti generiraju veliku količinu dokumenata i dokumenacija koju izvođač mora voditi na gradilištu postaje sve obimnija [1, 3]. Ona povezuje više sudionika faze izvođenja građevinskog projekta i ima više namjena koje treba zadovoljiti. Gradilišna dokumentacija pruža kronološke zapise o tome što je učinjeno, kada, od strane koga i pod kojim uvjetima [4] i u kojoj kvaliteti, pri tome ispunjavajući sve propisane zahtjeve. Uz to, ona može služiti za popunjavanje baza podataka korisnih za planiranje budućih radova, a u slučaju sporova vezanih za izvedbu građevinskih projekata, koji nisu rijetki, ta dokumentacija u pravilu je najvažniji dokazni materijal. Izvođač radova mora dokazati sve o obavljenim radovima i bez odgovarajuće dokumentacije zahtjevi za dodatnu financijsku naknadu ili produljenje roka izvedbe izuzetno teško se odobravaju [4].

Vođenje i upravljanje gradilišnom dokumentacijom podrazumijeva kreiranje, pisanje, uređivanje, organiziranje, pohranjivanje, reguliranje protoka i dijeljenje fizičke i digitalne dokumentacije vezane za realizaciju građevinskog projekta [1, 2], najvećim dijelom na samom gradilištu. O tome kako se vodi dokumentacija ovisi njena točnost, potpunost, ujednačenost, transparentnost i pravovremena dostupnost, što je jako važno za izvođača radova, investitora i njegove predstavnike te inspekcijske službe i arbitražna tijela. Shodno tome, vođenje gradilišne dokumentacije utječe na ispunjavanje kriterija koje iziskuje više međunarodnih normi, kao npr. ISO 9001, ISO/IEC 27001, ISO 37301 i ISO 14001.

Unatoč velikoj važnosti, gradilišna dokumentacija uglavnom se zanemaruje kao jedan od čimbenika upravljanja projektima [4]. Tradicionalna papirnata dokumentacija ima niz slabosti koje mogu dovesti do zastoja u radu i posljedično do gubljenja produktivnosti i rasta troškova izvedbe. Mnoge građevinske tvrtke, pogotovo manje i srednje, još uvijek se oslanjaju na obrasce na papiru i rukom pisane dnevne zapise te ekvivalente tome, skenirane zapise ili prebačene u PDF format, kao i raspršene fotografije pohranjene u nasumičnim mapama na nečijem telefonu ili računalu [4, 5].

Korištenjem računarstva u oblaku može se na središnjoj platformi centralizirati pohrana svih vitalnih dokumenata dokumenata (s jasno vidljivim slijedom promjena), kojima mogu pristupati svi ovlašteni sudionici projekta i imati dostupnu analizu podataka u stvarnom vremenu. Slika 1. pokazuje smjer razvoja vođenja i upravljanja gradilišne dokumentacije.



Slika 1. Prijelaz sa zapisa na papiru na digitalne alate i sustav pohrane u oblaku

No, građevinarstvo teže od drugih djelatnosti i industrija prihvaća nove digitalne tehnologije koje zahtijevaju početna ulaganja [6], čak i ako su dugoročne koristi značajne [7]. Uvođenje sustava za digitalno vođenje gradilište dokumentacije u praksi ima specifične prepreke i zato se ne odvija brzo i jednostavno.

2. Gradilišna dokumentacija

Dio dokumentacije koja se vodi na gradilištima u Hrvatskoj zakonima je propisan, slično kao i u drugim europskim državama, a uz to postoji i druga dokumentacija potrebna za poslovanje gradilišta. Ti dokumenti jamče usklađenost sa svim propisima, sigurnost, kontrolu kvalitete, praćenje dinamike radova i svega ostaloga bitnog za reguliranje ugovorenih odnosa investitora i izvođača.

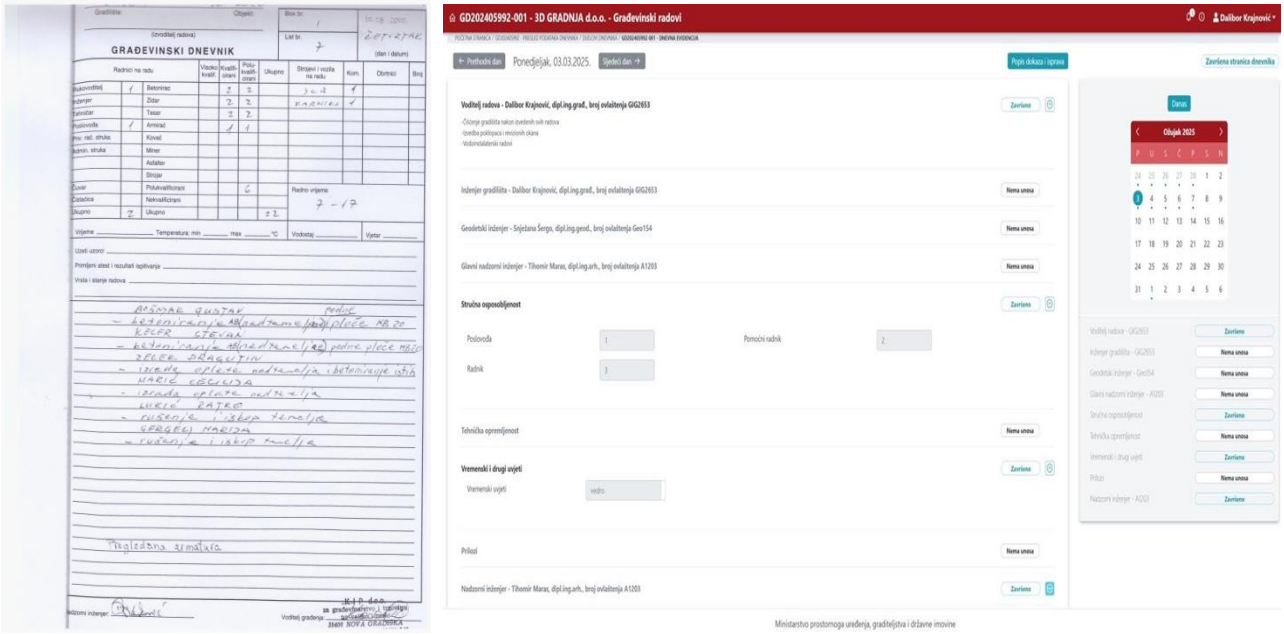
Dokumentacija koju prema Zakonu o gradnji (2025) izvođač mora imati na gradilištu ovisi o vrsti građevine, odnosno radova. Npr. procjena rizika, dokazi i zapisnici ne moraju se nalaziti na gradilištu na kojemu rad ukupno traje kraće od 60 dana, ali moraju biti dostupni u roku koji odredi nadležni inspektor [8]. U tabllci 1 je pregled dokumentacije obvezne kod izvođenja višestambenih zgrada i ostalih građevina te druge koja je uobičajena na gradilištima.

Tablica 1. Dokumentacija izvođača na gradilištu (prema [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15])

Propisano Zakonom o gradnji	Za provedbu mjera sigurnosti i zaštite zdravlja na radu	Za reguliranje obveza s investitorom i interno poslovanje izvođača
- rješenje o upisu u sudski registar, odnosno obrtnica i suglasnost za obavljanje djelatnosti građenja - ugovor o građenju između investitora i izvođača - akt o imenovanju glavnog inženjera gradilišta, inženjera gradilišta, odnosno voditelja radova - ugovor o nadzoru građenja - građevinska dozvola s glavnim projektom - izvedbeni projekt - izvješće o obavljenoj kontroli glavnog i izvedbenog projekta (ako je propisano za takav projekt) - elaborat iskolčenja građevine - građevinski dnevnik - dokazi o svojstvima i sukladnosti ugrađenih građevnih proizvoda, opreme i/ili postrojenja, isprave o sukladnosti određenih dijelova građevine te dokazi kvalitete (rezultati ispitivanja i dr.) - dokaz izvođača o propisnom zbrinjavanju neutrošenoga građevinskog materijala i postupanju s građevinskim otpadom	- preslika prijave gradilišta inspekciji rada - procjena rizika za radna mjesta na gradilištu i upute o rizicima na radu - plan zaštite na radu, uključujući preventivne mjere za postojeće opasnosti i upute za rukovanje radnom opremom i siguran rad - plan evakuacije i spašavanja u slučaju nesreće (obvezno kod rada na teško dostupnim mjestima) - plan izvođenja radova od koordinatora zaštite na radu (na gradilištima s dva i više izvođača) - dokazi i uvjerenja (evidencijski kartoni) o osposobljenosti za rad na siguran način, specifične poslove, pružanje prve pomoći i početno gašenje požara te o zdravstvenoj sposobnosti radnika - zapisnici o pregledu i ispitivanju opreme, instalacija i radnog okoliša - knjiga nadzora iz zaštite na radu - kontrolna knjiga skele	- shema gradilišta - interni nacrti i specifikacije izvođača - dinamički plan radova - bilješke o radu, uvjetima rada i incidentima na gradilištu - izvješća o radovima - korespondencija s investitorom i vlastima (uključujući razne zahtjeve) - nalozi za promjene projekta - zapisnici/bilješke sa sastanaka - građevinska knjiga - radni nalozi - evidencija radnog vremena radnika (tzv. šihterica) - narudžbe (tzv. trebovanja) i otpremnice materijala - računi i drugi dokumenti za troškove i plaćanja na projektu - foto i video dokumentacija izvedbe radova

Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine izradilo je uslugu za elektronsko vođenje građevinskog dnevnika (eGrađevinski dnevnik), koja je u funkciji od početka 2022. godine, a od početka 2023. u Hrvatskoj je obvezno njeno korištenje za sve nove projekte [16]. Usluga je namijenjena praćenju procesa građenja od prijave početka građenja do tehničkog pregleda građevine, odnosno izdavanja uporabne dozvole. eGrađevinski dnevnik povezan je s već razvijenim modulima iz Informacijskog sustava prostornog uređenja (kao što je eDozvola) na način da se svi potrebni podatci iz prijave početka građenja povlače u eGrađevinski dnevnik. Na temelju tih podataka dnevnik

pokreće i otvara nadzorni inženjer unosom podataka o svim ostalim sudionicima u građenju, a nakon toga vodi ga inženjer gradilišta i/ili voditelj radova, uglavnom na tabletu ili drugom računalu. Svakodnevno upisivanje podataka u eGrađevinski dnevnik ovjerava se isključivo kvalificiranim elektroničkim potpisom ovlaštene osobe (sukladno Uredbi (EU) 910/2014), koji nosi i vrijeme nastanka, s čim je onemogućeno neprimjetno naknadno dopisivanje ili mijenjanje podataka. Ovakvo *web cloud* sustavno rješenje omogućuje spremanje dokumentacije u digitalnom obliku na jednom mjestu (tu mora biti sva dokumentacija koja je potrebna za tehnički pregled - od kompletne projektne dokumentacije do završnih izvješća) tako da je istovremeno dostupna neograničenom broju ovlaštenih korisnika (sudionika projekta), neovisno o lokaciji ili uređaju koji koriste.
Cilj vođenja dnevnika na ovaj način je podizanje razine kvalitete građenja te povećanje dostupnosti informacija na jednom mjestu, izbjegavanje problema gubitka dokumentacije ili nedostatka dokumentacije za tehnički pregled i rješavanje problema neujednačenosti poslovanja u Hrvatskoj (osigurano je da svi rade po istim pravilima koja su isprogramirana u sustavu) te sa svim tim olakšavanje realizacije građevinskih projekata [17]. Slika 2. lijevo pokazuje ručni upis u građevinski dnevnik na tiskanim obrascima i desno korisničko sučelje za upis za svaki radni dan u eGrađevinskom dnevniku.



Slika 2. Primjeri nekadašenjeg i sadašnjeg bilježenja podataka u građevinski dnevnik

Osim građevinskog dnevnika, i neki drugi dokumenti iz tablice 1 danas se često vode na računalima s odgovarajućim programima, ali koji su međusobno nepovezani. Primjerice, u upotrebi su specijalizirani programi za evidenciju o radnicima i strojevima i o provedenim ispitivanjima na gradilištu, za izradu i ažuriranje dinamičkih planova radova i praćenje njihove realizacije, za pisanje građevinske knjige i situacija za naplatu radova i dr.
Čuvanje dokumentacije također je zakonska obveza, a razlikuje se ovisno o vrsti dokumenta [9, 13]. Nakon završetka gradnje investitor odnosno vlasnik građevine dužan je trajno čuvati građevinsku dozvolu s glavnim projektom, izvedbeni projekt i dokaze o

svojstvima ugrađenih građevnih proizvoda, dokaze o sukladnosti ugrađene opreme i/ili postrojenja, isprave o sukladnosti određenih dijelova građevine te dokaze kvalitete, a nadležno ministarstvo dužno je trajno čuvati građevinski dnevnik u elektroničkom obliku na medijima koji omogućuju zahtjevanu trajnost elektroničkog zapisa [9].

3. Slabosti tradicijskog i prednosti digitalnog vođenja dokumentacije

3.1. Problemi s tradicijskim vođenjem dokumentacije

Općenito se smatra da fragmentirani podatci i slabo vođenje gradilišne dokumentacije dovode do zastoja u radu koji su jedan od razloga niske produktivnost građevinarstva [18]. Tradicijsko vođenje ove dokumentacije pretežito je na papirima, uobičajno raspoređenim u registratorima u upravi gradilišta, a u novije vrijeme i u neobjedinjenim računalnim dokumentima. U tablici 2 su na temelju pregleda literature pojašnjene slabosti povezane s takvim vođenjem dokumentacije.

Tablica 2. Problemi tradicijskog vođenja gradilišne dokumentacije [1, 3, 4, 14, 19, 20]

Mane	Objašnjenje problema
Nečitljivost i dvosmislenost	Rukom pisani unosi mogu biti teško čitljivi, a kratice i nedosljedna terminologija dvosmisleni (što je posebno problematično ako je to dokaz u kasnijem pravnom sporu).
Nepotpunost i netočnost	Građevinski dnevnici, izvješća i drugi zapisi na papiru ponekad su nepotpuni jer su voditelji radova ili drugi koji ih pišu zauzeti s mnogim hitnim, neodložnim poslovima, pa ih ispunjavaju po sjećanju tek na kraju radnog dana, na kraju tjedna ili još kasnije od onoga na što se odnose i onda se dogodi da se neki kritični detalji zaborave ili netočno zabilježe. Na papirnatim dokumentima često nedostaje pojednostavljeni pristup pisanja, a proizvoljno i neujednačeno bilježenje dovodi i do izostavljanja nekih podataka. Kada uprava izvođača treba tumačiti realizaciju projekta na temelju takvih terenskih bilješki i usmenog ažuriranja često nema potpuna saznanja o kontekstu događanja na gradilištu.
Sklonost pogreškama i gubljenje vremena	Prilikom prepisivanja i višestrukog unošenja podataka (npr. prvo na papiru, a poslije u neki računalni program ili e-poštu) događaju se pogrešake i neusklađene verzije dokumenata. Uz to, višestruko pisanje, ručna obrada podataka, skeniranje i formatiranje oduzima vrijeme.
Teškoće u pronalaženju	Podatci se često bilježe na različite načine (npr. u *Excel* tablicama, e-pošti i na papiru) i to može otežati pronalaženje dokumenata i relevantnih podataka. Teško je pronaći odgovarajuće dokumente kada su fragmentirani, raspršeni ili pomiješani, što biva ako nema sustavne organizacije po projektu, fazi radova ili drugom kriteriju.
Oštećivanje i gubljenje	Papirnati dokumenti oštećuju se zbog vremenskih uvjeta i loših uvjeta kojima se izloženi na gradilištu (vlaga, prljavština i dr.) i lako se gube (npr. pogrešno se arhiviraju ili slučajno bace). Kada nisu sustavno spremljene gube se i dokumenti i cijele datoteke na računalima ili drugim medijima, a nekada su nedostupni jer su zaključani. Događa se da su fotografije snimljene na poslu na mobitelu pomiješane s privatnim sadržajima i da su metapodaci (datum, vrijeme, GPS lokacija/koordinate) netočni ili su uklonjeni prilikom dijeljenja (dijeljenje fotografija putem *WhatsAppa* ili e-pošte komprimira slike i uklanja metapodatke). U mnogim slučajevima kada zaposlenik napusti tvrtku njegove fotografije i sva znanja s posla nestanu s njim.
Otežana pristupačnost i preuzimanje te zauzimanje prostora	Sva papirnata dokumentacija gradilišta zauzima puno prostora, a kada netko nešto od toga treba mora doći fizički to pregledati, preuzeti i/ili kopirati (što oduzima vrijeme i stvara mogućnosti da se dokumenti zagube). Općenito, ručno ažuriranje i usklađivanje, pronalaženje i dijeljenje papirnate dokumentacije usporava protok informacija.
Teška sljedivost više verzija dokumenata	Kod nesustavno vođenih dokumenata na papirima lako se izgubi trag izmjena i događa se da nije jasno koja je verzija nekog dokumenta zadnja (najnovija), odnosno koja je kojoj prethodna, pa onda može doći oslanjanja na zastarjele podatke,

3.2. Poboljšanja koja donosi digitalna tehnologija

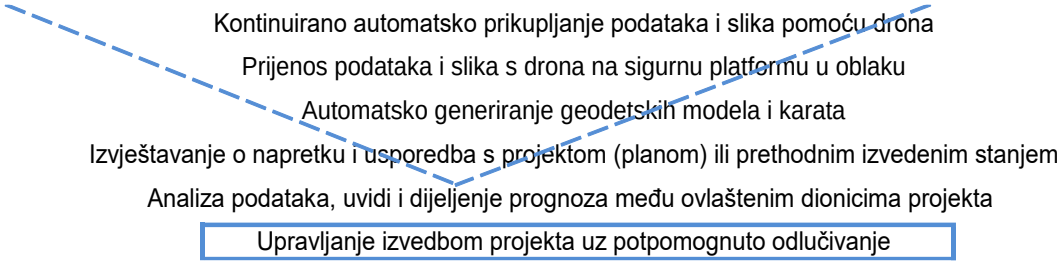
Uspješna implementacija digitaliziranog sustava za rad s gradilišnom dokumentacijom može otkloniti mane tradicijskog vođenja dokumentacije i kroz manji utrošak vremena, efikasniju razmjenu podataka i komunikaciju te vjerodostojnije dokumentiranje bitno unaprijediti svakodnevno poslovanje izvođača radova. Na temelju pregleda dostupnih izvora u tablici 3 opisane su prednosti koje pružaju digitalne tehnologije kod vođenja gradilišne dokumentacije.

Tablica 3. Prednosti digitalnog vođenja gradilišne dokumentacije u odnosu na tradicijsko

Prednosti	Reference
Dobra preglednost, točnost i potpunost izvješća zbog standardiziranih, ujednačenih, dobro strukturiranih digitalnih obrazaca koji vode korisnike kroz sva obvezna polja i tako smanjuju vjerojatnost da se pri ispunjavanju izostave važni podaci, a uz to aplikacije upozoravaju na eventualne greške prilikom unosa podataka.	[3, 4, 14, 19]
Ušteda vremena za administrativne poslove s dokumentacijom procijenjuje se na oko tri puta ili nekoliko sati tjedno manje u odnosu na tradicijsko vođenje. Tome doprinosi izbjegavanje pisanja suvišnih podataka i višestrukog upisivanja istog te automatizirano generiranje izvješća i automatski unos podataka, kao što su kod dnevnih zapisa odgovarajući datum, podatci o projektu i (g)radilištu, vremenski uvjeti (preuzeti od meteoroloških službi) te broj ili popis radnika i strojeva na gradilištu (preuzet iz sustava za praćenje prisutnosti i radnog vremena). Postoje i opcije za audio snimke, diktiranje s pretvaranjem glasa u tekst i prepoznavanje rukopisa, koje olakšavaju unos podataka i vođenje dokumentacije.	[2, 4, 14, 15, 19, 21]
Upozoravanje na termine odlaska radnika na liječnički pregled, potreban pregled strojeva, istek certifikata, nepotpuni zapisnik, kašnjenje izvješća i dr.	[1, 22]
Fotografije se snimaju izravno unutar mobilne aplikacije za dokumentaciju, što osigurava automatsko dodjeljivanje metapodataka (ugrađeni su u svaku fotografiju), povezivanje s projektom (svaka fotografija automatski se povezuje s odgovarajućim projektom i lokacijom), kategorizaciju (fotografije se mogu označiti prema kategoriji, kao npr. napredak, isporuka, sigurnost itd.), napomene (mogu se dodavati bilješke, strelice i druge oznake izravno na fotografije) i trenutni prijenos (fotografije se sinkroniziraju s oblakom u stvarnom vremenu).	[4, 12, 14]
Sve aktivnosti i odstupanja dokumentiraju se izravno na terenu (može pomoću aplikacije na pametnom telefonu ili tabletu), a kasnije se mogu dovršiti na računalu. Izravno prikupljanje podataka na gradilištu u stvarnom vremenu moguće je i bez internetske veze (*offline* funkcija) jer se promjene pohranjuju lokalno i podatci se automatski sinkroniziraju s oblakom čim ponovno bude uspostavljen pristup internetu. O svim ažuriranjima u stvarnom vremenu informirani su svi potrebni korisnici, dok elektronički potpisi osiguravaju integritet podataka.	[3, 4, 14, 15, 19, 23]
Samo ovlašteni korisnici mogu pristupiti dokumentima i izvješćima i onemogućeno je njihovo neovlašteno i nekontrolirano mijenjanje (zaštita lozinkama i šifriranjem).	[4, 6, 23]
Optimalno organizirano spremanje dokumenata po određenim kategorijama na centralnoj platformi (u oblaku), uz funkcije filtriranja podataka i pretraživanja (npr. prema ključnim riječima) olakšava pronalaženje onog što je potrebno, a minimizira fizički prostor za arhiviranje dokumenata i potrošnju papira. Pristup dokumentaciji moguć je s bilo kojeg mjesta, u bilo koje vrijeme i od više korisnika istovremeno. Dostupnošću ažuriranih dokumenata i podataka u stvanom vremenu omogućena je dobra suradnja i s najudaljenijim dionicima projekta.	[1, 2, 3, 4, 12, 15, 19, 21, 23]
Sve promjene zapisa ostaju kontrolirane, dokumentirane i jasno sljedive.	[14, 19, 23]
Lako je kopirati i ponovno upotrijebiti dijelove digitalnih dokumenata.	[2, 14]
Digitalni zapisi i fotografije s točno označenim vremenom i lokacijom nastanka vjerodostojniji su dokazi i u pravnim sporovima imaju jaču vrijednost od rukom pisanih bilješki.	[4]

Čuvanje dokumenata dugoročno je sigurno. Ne postoji rizik od gubitka podataka pohranjenih u nečijem prijenosnom računalu, USB-u ili pametnom telefonu jer kada djelatnik napusti tvrtku ili prijeđe na drugi projekt sva dokumentacija ostaje u sustavu.	[1, 4, 15, 19]

Stalno se pronalaze nova, inovativna rješenja za specifične probleme i dodatno unaprjeđenje upravljanja u okviru platforme za digitalno vođenje gradilišta, odnosno građevinskog projekta. Osim navedenog u prethodnoj tablici, u kombinaciji s dodatno integriranom digitalnom opremom izvođaču radova pružaju se različite druge prednosti kod upravljanja. Primjerice, pretraživanje i izvješćivanje potpomognuto umjetnom inteligencijom uz praćenje napretka realizacije daje uvid u iskorištenost angažirane mehanizacije, a analitika automatski ističe trendove performansi, pa je s tim podatcima odlučivanje izvjesnije [3, 4, 18, 19, 21]. Takav proces donošenja odluke pokazuje slika 3.



Slika 3. Proces od prikupljanja do analize podataka i odlučivanja uz pomoć digitalnih tehnologija (prilagođeno prema [21])

4. Unaprjeđenje vođenja gradilišne dokumentacije

4.1. Prepreke implementaciji digitalne tehnologije u građevinarstvu

Danas postoje velike mogućnosti koje pružaju digitalne tehnologije, ali one su na gradilištima još uvijek dosta slabo iskorištene [19, 24]. Poslovanje u građevinarstvu je konzervativnije i sporije se mijenja od većine drugih djelatnosti i industrija. Primjerice, iako su mnogi građevinski strojevi već kontrolirani GPS-om, informacije o trenutnom stanju gradilišta, još uvijek se najčešće prikupljaju i procjenjuju na tradicionalni način [21]. Neki vrsni stručnjaci smatraju da su glavne prepreke digitalizacije građevinarstva organizacijske, a ne tehnološke [20]. Prijelaz na digitalnu dokumentaciju u praksi nailazi na otpor koji često proizlazi iz generacijske podjele i dugotrajnog oslanjanja na ručne procese [1, 4]. Djelatnici koji su desetljećima koristili papirnatu dokumentaciju mogu digitalne alate smatrati nepotrebnima ili nepouzdanima. Ako nisu imali većih problema ili nisu svjesni nedostataka papirnate dokumentacije, ona im se čini trajnom i pouzdanom, dok su prema digitalnim alatima skeptični [1]. To može biti naročito izraženo ako odmah u početku njihove primjene dođe do nekih problema i nije sve idealno. Najčešće sumnje i otpor za prijelaz na vođenje dokumentacije pomoću digitalnih tehnologija odnose se na nedovoljne digitalne vještine djelatnika (pogotovo starijih), lošu internetsku vezu na nekim gradilištima te slabu kompatibilnost novih digitalnih alata s postojećim sustavima, Uz to, potrebni su početni troškovi, koji su posebno problematični za manje tvrtke [4, 19], obzirom da one općenito imaju vrlo ograničene raspoložive financijske i ljudske resurse. Digitalna spremnost organizacije olakšava donošenje povoljnih odluka jer će imati niže troškove

transformacije nego one koje u tome više zaostaju [6]. Nalazi studije Lyson Zulua i ostalih (2023) pokazuju da prednosti digitalizacije nadmašuju uočene nedostatke i sugeriraju preispitivanje tradicionalnih modela opravdavanja tehnoloških promjena u građevinarstvu.

4.2. Proces prijelaza na sustav s digitalnim vođenjem dokumentacije

Neke prethodno istaknute prepreke prijelazu na digitalno vođenje dokumentacije potpuno su neopravdane, a neke imaju osnove, ali se mogu prevladati pravilnim pristupom. Razumijevanje razloga za sumnju i provedba učinkovitih strategija ključni su za uspješnu digitalnu transformaciju [1]. Prepoznavanje problema s tradicionalnim pristupom i naglašavanje bitnih prednosti koje omogućuje digitalni format potiče usvajanje novog sustava vođenja dokumentacije i zato je važno da djelatnici budu s tim upoznati [19].

Prijelaz od ručnog, reaktivnog načina rada do potpuno digitalnog poslovanja potpomognutog umjetnom ineligencijom izazov je jednako kulturni koliko i tehnički [18], ali ne mora biti u jednom skoku [3]. Digitalna dokumentacija ne zahtijeva naglu i odmah potpunu tehnološku reformu. Može se napredovati postupno, praveći manja, poboljšanja s pozitivnim utjecajem na poslovanje. Počinje se jednostavnom zamjenom papirnatih dnevnih izvješća i ad-hoc fotografija s mobitela strukturiranim sustavom temeljenim na oblaku [4]. Mnogi digitalni alati dizajnirani su da budu jednostavni za korištenje, slični već poznatim računalnim aplikacijama [5]. Osim toga, moderni građevinski strojevi često već jesu opremljeni softverom koji omogućuje aktiviranje usluga povezanih s oblakom [3].

Slika 4 pokazuje postepeno uvođenje sustava digitalne dokumentacije prema [1] i [4].

1. **Procjena trenutnog stanja**
   - utvrđivanje koja je se sve dokumentacija potrebna
   - definiranje odgovornosti za dokumentaciju radnih mjesta u organizaciji (voditelji gradilišta, predradnici, djelatnici za sigurnost i dr.)
   - utvrđivanje kako se dokumenti trenutno pohranjuju i dijele (na papirima, na računalima, e-pošta, mape u oblaku, USB ili dr.)
   - utvrđivanje postojećih problema s dokumentacijom (kasna izvješća, izgubljeni dokumenti, nedostaju fotografije itd.)
   - uzimanje u obzir propisa i regulatornih zahtjeva koji se primjenjuju kod realizacije projekate
2. **Definirajte zahtjeva za vođenje dokumentacije po važnosti** (na temelju procjene)
   - neophodne značajke (npr. predlošci dnevnih izvješća, fotodokumentacija s metapodacima, pohrana u oblaku, mobilni pristup)
   - važne značajke (npr. integracija praćenja vremena, upravljanje dokumentima, mogućnost rada izvan mreže, pretvaranje u PDF)
   - korisne značajke (npr. integracija vremenskih podataka, automatizirana izvješća o usklađenosti, pristup portalu naručitelja)
3. **Izbor odgovarajuće platforme za digitalnu dokumenaciju** uz uvažavanja kriterija kao što su:
   - jednostavnost korištenja (tako da svi koji trebaju koristiti određene alate mogu to brzo naučiti)
   - prilagođenost mobilnim uređajima (jer se dokumentacija se odvija na gradilištu, uključujući i područja s ograničenom povezanosti)
   - mogućnost rada izvan mreže i sinkroniziranje kada se veza vrati (gradilišta često imaju slabu ili nikakvu pokrivenost s internetom)
   - mogućnosti integracije s postojećim sustavima izvođača (npr. za obračun plaća i upravljanje projektima)
   - sigurnost podataka, odnosno odgovarajuća kontrola pristupa i zaštita podataka (građevinska dokumentacija često sadrži osjetljive poslovne podatke)
   - skalabilnost (mogućnost rasta s poduzećem i prihvaćanje više istovremenih projekata)
4. **Obuka i pilot projekt** za stjecanje isustva - uvježbavanje i isprobavanje digitaliziranog sustava (barem 4 - 6 tjedana na jednom pogodnom projektu)
   - praktična obuka za sve korisnike (ne u učionici nego na terenu)
   - prikupljanje povratnih informacija i što prije rješavanje problema na koje ukazuju
   - usporedba kvalitete digitalnih zapisa i uštede vremena u odnosu na papirnatu dokumentaciju, odnosno prethodni način rada
5. **Poboljšanja sustava na temelju saznanja iz pilot projekta, uvođenje na sve projekte i standardizacija**
   - određivanja standarda tvrtke za dokumente koji se moraju kreirati (po događaju, dnevno i tjedno), za fotodokumentiranje (minimum fotografija po danu i potrebne kategorije), za imenovanja i dozvole za pristup prema funkciji na projektu te utvrđivanje pravila za zadržavanje dokumenata i strukture arhiviranja
6. **Kontinuirano nadziranje, slanje i analiza povratnih informacija** (od gradilišnih timova)**, održavanje i poboljšavanje sustava** (po načelu *kaizena*)

Slika 4. Koraci prijelaza na napredni sustav s digitalnom dokumentacijom

Pri izboru digitalnih alata nabavu softvera i hardvera te obučavanje djelatnika treba računati kao početni trošak. Općenito, mišljenje je da će za većinu izvođača radova to biti isplativo [3], ali kako bi se odredio period povrata ulaganja treba procijeniti koliko će sati rada uštedjeti novi način rada, a uz to treba imati u vidu i rizik gubitka novca i vremena koje bi izvođač mogao imati zbog nenaplaćenih radova, izgubljenog pravnog spora s investitorom ili neke regulatorne kazne u slučaju da nema odgovarajuću dokumentaciju kojom bi zaštitio svoja prava i interese.

Digitalna transformacija u građevinarstvu nerijetko se svodi samo na kupovinu i nedovoljno pripremljeno uvođenje novih digitalnih alata. Pogrešno je što se pri tome zanemaruje potreba za suštinskim promjenama u organizaciji rada, kao što su upravljanje informacijama i odgovornosti [20]. Organizacija nije proizvod koji se može kupiti na tržištu, već se kroz odgovarajući proces mora stvarati u okviru tvrtke [25], prilagođeno njenim uvjetima i potrebama. Sve mogućnosti koje nude digitalni alati, umjetna inteligencija, dronovi i sl. iziskuju prilagođavanje, ne samo ulaganjem u tehnologiju nego i u ljude i njihove kompetencije [25]. Pružanje dobro prilagođene obuke i kontinuirane podrške korisnicima ključno je da se osigura učinkovito korištenje digitalnih alata. Korisnici moraju biti informirani o najboljim praksama u upravljanju građevinskom dokumentacijom, a priručnici i video upute trebaju im biti lako dostupni [19].

Uprava ima stratešku ulogu u osiguravanju toga da organizacije budu sposobne i spremne prihvatiti promjene [24]. Podrška vodstva tvrtke izuzetno je važna i ono treba davati primjer s novim sustavom rada [1] te prikladnim stilom rukovođenja poticati komunikaciju i organizacijsku kulturu koja prihvaća inovacije [24, 26] te osnaživati svoje zaposlenike. Transformacijsko vodstvo odgovarajućim motiviranjem potiče osnaživanje, inovacije i potrebne organizacijske promjene, a transakcijsko vodstvo osigurava potrebnu proceduralnu usklađenost i održavanje strukture [27].

5. Zaključak

Građevinski projekti sve su veći i složeniji, dok su kontrola i propisi sve rigorozniji, pa s tim raste i potreba za dokumentcijom tijekom građenja. Na gradilištima ima puno toga što treba svakodnevno dokumentirati, a za to zadužene osobe skoro uvijek su u gužvi. Stoga je vrlo poželjno ubrzavanje i olakšavanje administrativnih poslova i s tim unaprjeđenje upravljanja kod izvođača.

U suvremnom upravljanju izvedbom građevinskih projekata sve su uočljivije i sve problematičnije slabosti tradicijskog načina vođenja dokumentacije. Dokumentacija gradilišta previše je važna da bi bila prepuštena rukom pisanim bilješkama i neorganiziranim fotografijama. Pogreške i nedostatci u papirnatoj dokumentaciji mogu uzrokovati velike komplikacije, najviše izvođaču koji je vodi. Iako se građevinska operativa generacijama oslanjala na papirnate dokumente, brzi napredak tehnologije omogućio je u mnogome bolji rad s dokumentacijom i bolje upravljanje informacijama. Digitalna transformacija revolucionira upravljanje izvedbom građevinskih projekata pretvaranjem fizičkih dokumenata u organizirane digitalne sustave. S tim se ubrzava administrativni dio posla, osigurava točnost i dostupnost podataka u stvarnom vremenu, povećava efikasnost rada, smanjuje oslanjanje na fizičku pohranu dokumenata i jača njihov integritet i

vjerodostojnost. Iako nema nezavisnih studija koje to točno dokazuju podatcima s većeg broja različitih slučajeva (projekata) u praksi, primjena digitalnih tehnologija izvođačima radova nesumnjivo može biti vrlo korisna i na gradilištu i u upravi tvrtke.

Imajući u vidu financijske, tehničke, društveno-kulturne i organizacijske prepreke koje na različite načine ometaju izvođačke tvrtke u usvajanju novog načina rada, predlaže se postupni prijelaz od tradicijskog vođenja dokumentacije do računalnog sustava koji objedinjuje postupanje s dokumentacijom i alate za unaprjeđenje upravljanja. Pri tome bi, u duhu *kaizena*, trebalo težiti kontinuiranom održavanju, prilagođavanju i poboljšavanju tog sustava.

Prijelaz na digitalnu dokumentaciju nije samo tehnološka nadogradnja, već strateški pomak kojim se redefinira način poslovanja građevinskih izvođača i osigurava budućnost njihovog poslovanja. U tome ključnu ulogu ima uprava izvođača s odlučivanjem, organiziranjem, rukovođenjem zaposlenicima i liderstvom.

6. Literatura

[1] Nowinski, Cristen; Riso, Taylor. The Evolution of Construction Documentation, 2024. https://www.procore.com/library/construction-documentation (Pristup 18.05.2026.)

[2] Ginsberg, Lauren. Construction Document Management Best Practices, 2026. https://www.autodesk.com/blogs/construction/construction-document-management/

[3] Olsen, Jeny. The Advantages of Digital Documentation in Construction and Mining, 2025. https://www.volvoce.com/canada/en-ca/resources/blog/2025/the-advantages-of-digital-documentation-in-construction-and-mining/ (Pristup 25.06.2026.)

[4] Crew active team. Digital Construction Site Documentation: A Complete Guide, 2026. https://www.crew-active.de/en/ressourcen/blog/digital-construction-documentation/ (Pristup 28.05.2026.)

[5] The Advantages of Digital Documentation and mining, Volvo Construcion Equipment & Services, 2026. https://www.vcesvolvo.com/the-advantages-of-digital-documentation-in-construction-and-mining/ (Pristup 30.05.2026.)

[6] Zulu Lyson Sambo; Saad, Ali M.; Gledson, Barry. Exploring Leaders' Perceptions of the Business Case for Digitalisation in the Construction Industry // *Buildings*, 13(2023), 701; 1-16. (ISSN 2075-5309)

[7] Agarwal, Rajat; Chandrasekaran, Shankar; M. Sridhar, Mukund. Imagining construction's digital future. Singapore: McKinsey Productivity Sciences Center, 2016.

[8] Uputa za provedbu mjera sigurnosti i zaštite zdravlja na radu prilikom izvođenja građevinskih radova na sanaciji objekata, 2020. https://uznr.mrms.hr/wp-content/uploads/ 2020/04/uputa_za_gradilista_2020.pdf (Pristup 25.5.2026.)

[9] Zakon o gradnji // *Narodne novine*, 155(2025), (ISSN 1333-9273)

[10] Zakon o zaštiti na radu // *Narodne novine*, 71(2014) i 118(2014) // *Narodne novine*, 71(2014) i 118(2014), (ISSN 1333-9273)

[11] Pravilnik o zaštiti na radu na privremenim ili pokretnim gradilištima // *Narodne novine*, 48(2018), (ISSN 1333-9273)

[12] McCaig, Jessica. Construction Site Management: A Practical Guide, 2025. https://visibuild.com/news/construction-site-management-guide/ (Pristup 21.5.2026.)

[13] Sousa, Franck. Construction site document management: 10 Essential Questions, 2025. https://www.alobees.com/en/conseils/construction-site-document-management (Pristup 25.06.2026.)

[14] Wirth, Mathias. Digital Construction Site Documentation & Construction Reporting. Insite LMS, 2025. https://www.insite-lms.com/en/site-management/construction-site-documentation-and-reporting/ (Pristup 15.05.2026.)

[15] Construction Documentation Software & App: Quick, Simple & Reliable. https://bau-master.com/gb/features/construction-documentation-software/ (Pristup 17.05.2026.)

[16] Pravilnik o izmjeni Pravilnika o načinu provedbe stručnog nadzora građenja, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera // *Narodne novine*, 68(2022), (ISSN 1333-9273)

[17] Bogdan, Anđela. e-Građevinski dnevnik // *Građevinar*, 74(2022), 2; 155-156. (ISSN 0350-2465)

[18] Thompson, Nick. The Future od Digital Construction Report 2025. https://digitalconstructionplus.com/the-future-of-digital-construction-report-2025/?gc_ov=ok (Pristup 15.05.2026)

[19] Why Paper Spaces Are a Thing of the Past – Embrace Digital Documentation for a Smarter Workflow. https://premiercs.com/blog/why-paper-specs-are-a-thing-of-the-past-embrace-digital-documentation-for-a-smarter-workflow (Pristup 17.05.2026.)

[20] Jovičić, Stevan. Digitalna transformacija građevinarstva, Razgovor s Žigom Turkom // *Industrija*, 119(2026), 21; 16-19. (ISSN 1459-3639)

[21] Unterstell, Burkhard; Jarroush, Jad. The digital construction site - tangible opportunities for the future of the construction industry https://ksa.dorsch.com/ (Pristup 20.06.2026.)

[22] ZNR.admin cloud- moderno vođenje evidencije zaštite na radu, https://www.internet-arhiva.hr/znr.shtml?trk=products_details_guest_secondary_call_to _action (Pristup 28.06.2026.)

[23] García, Juan Bernardo i ostali. Digitalization of Construction Documents: The Future of Construction Documentation. Baker McKenzie, 2025. https://www.bakermckenzie.com/-/media/files/insight/publications/2025/05/digitalization-of-construction-documents.pdf (Pristup 24.06.2026.)

[24] Liphadzi, Murendeni; Aigbavboa, Clinton; Osunsanmi, Temidayo; Didibhuku Thwala, Wellington. Leadership styles in the adoption of 4IR technologies in the construction industry, // Organization, Technology and Management in Construction, 17(2026); 82-97. (ISSN 1847-6228)

[25] Jovičić, Stevan. Izazovi upravljanja u građevinarstvu, Razgovor s Mladenom Radujkovićem // *Industrija*, 119(2026), 21; 26-28. (ISSN 1459-3639)

[26] Schiuma, Giovani; Schettini, Eva; Santarsiero, Francesco; Carlucci, Daniela, The transformative leadership compass: Six competencies for digital transformation entrepreneurship // *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 28(2022), 5; 1273-1291. (ISSN 1758-6534)

[27] Algahtany, M. A. Mahdi, Bardai, Barjoyai. Quality attention/contingent reward and leadership styles (transformational/transactional) // *International Journal of Economics Management Studies*, 6(2019), 2; 57-81. (ISSN 2393-9125)

Electromagnetic Field Transmission through Modern Building Materials: A Comparative Study of Concrete and Brick

V. Mandrić[1,*], S. Rupčić[1], L. Filipović[1], J. Spišić[1]

[1]Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, J. J. Strossmayer University of Osijek, 31000 Osijek, Croatia

[*] Corresponding author. E-mail: vanja.mandric@ferit.hr

Abstract

This paper presents a comparative numerical study of electromagnetic wave transmission through two representative modern building materials, concrete and brick. The analysis focuses on the transmission coefficient S_{21} as an indicator of electromagnetic attenuation and investigates the influence of material losses associated with different moisture conditions. Numerical simulations were carried out using a full-wave electromagnetic model in ANSYS HFSS over the frequency range from 0.10 GHz to 5.00 GHz, which is relevant to contemporary radio communication systems. The results show that increasing dielectric losses reduces the transmitted electromagnetic field, with the effect becoming more pronounced at higher frequencies. Compared with free-space propagation, both materials introduce additional attenuation, with concrete exhibiting stronger attenuation than brick under identical simulation conditions. On average, the additional attenuation is approximately 9.60 dB for brick and 12.80 dB for concrete. These findings highlight the importance of electromagnetic material properties in the assessment of indoor wave propagation and in the selection of building materials for environments requiring controlled electromagnetic transmission.

Key words: brick, building materials, concrete, electromagnetic transmission, transmission coefficient S_{21}.

1. Introduction

The increasing use of modern building materials has heightened interest in their electromagnetic (EM) properties, particularly their capacity to attenuate electromagnetic fields. The dielectric properties of materials at microwave frequencies, as well as their interaction with electromagnetic waves, have been widely discussed in the literature [1], [2]. In addition to meeting mechanical and thermal requirements, building materials are increasingly considered in the context of electromagnetic compatibility, indoor radio-wave propagation, and protection in environments exposed to EM radiation [2].

Whereas previous studies have focused on traditionally constructed buildings and biomaterial-based building materials [3], [4], this work extends the analysis to widely used modern materials, specifically concrete and brick. The rapid expansion of wireless communication systems has increased the density of electromagnetic sources, prompting the investigation of building materials as passive means of controlling EM wave propagation, especially in sensitive environments.

Electromagnetic wave propagation through building materials has been studied for several decades, particularly in the context of radar-based testing, indoor propagation, and material-induced attenuation. Previous studies have shown that the electromagnetic response of concrete and other construction materials is governed by standard material parameters such as relative permittivity (ε_r), electrical conductivity (σ), dielectric losses, loss tangent (tan δ), moisture content, and density [5]–[9]. These parameters determine the velocity, attenuation, reflection, and transmission of electromagnetic waves through a material and therefore form the basis for numerical modelling of wave propagation through concrete and brick.

The theoretical foundations of electromagnetic wave propagation and material interaction are comprehensively presented in [10], [11], while more application-oriented studies have focused on building materials. Holloway et al. [12] investigated the electromagnetic properties of concrete block walls and demonstrated the influence of material composition on attenuation. Vizi and Vandenbosch [13] analyzed the combined effect of material properties and geometry on wave interaction with building structures. More recent studies have emphasized the experimental characterization of dielectric properties. Zhekov et al. [14] reported the frequency-dependent behavior of common building materials, while Dinh et al. [15] showed the significant impact of pore structure and moisture content on the electromagnetic properties of concrete. The fundamental interaction mechanisms between electromagnetic fields and dielectric materials are also well established in classical works such as von Hippel [16].

Despite these contributions, most studies focus either on general material characterization or propagation modelling, while systematic comparative analyses of modern construction materials under controlled electromagnetic parameter variations remain limited. In particular, the influence of moisture-related dielectric losses, represented through variations of the loss tangent, on the transmission coefficient S_{21} has not been sufficiently addressed within a unified numerical framework.

Therefore, this paper presents a comparative numerical study of electromagnetic wave transmission through two representative modern building materials, concrete and brick. The analysis focuses on the transmission coefficient S_{21} as a quantitative indicator of electromagnetic wave attenuation. By introducing controlled variations of the loss tangent to represent different moisture conditions, the study provides a physically grounded assessment of its impact on S_{21} under far-field conditions. The results offer practical insights into electromagnetic wave propagation through commonly used building materials and their potential role in passive attenuation and propagation control in indoor environments.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 presents the numerical modelling approach, Section 3 discusses the simulation results, and Section 4 concludes the paper.

2. Numerical Modeling and Transmission Analysis of Electromagnetic Waves Through Modern Building Materials: Concrete and Brick

This section outlines the numerical modelling approach used to investigate the propagation of electromagnetic waves through representative modern building materials, specifically concrete and brick. The primary objective is to evaluate the transmission characteristics of these materials under controlled electromagnetic conditions, with particular emphasis on the transmission coefficient S_{21} as a key indicator of field attenuation.

The analysis is based on a full-wave electromagnetic simulation framework, enabling a detailed assessment of wave–material interactions in terms of transmission behavior, material losses, and the influence of electromagnetic parameters. Special attention is given to the effect of moisture content, modelled through variations in the loss tangent tan δ, to examine its impact on the attenuation of electromagnetic waves.

This approach aims to provide a systematic and physically grounded comparison of commonly used construction materials, contributing to a better understanding of their role in electromagnetic shielding and propagation control in practical environments.

The numerical simulations were conducted using ANSYS HFSS (version 2025 R2), a full-wave electromagnetic solver based on the finite element method (FEM). The simulation model comprises a T_x and a R_x antenna, represented by two conical dipole antennas designed to operate over a wide frequency range.

The geometrical configuration of the model is as follows. A slab representing the material under investigation is positioned 830 mm from the antennas, thus satisfying the far-field condition. The dimensions of the dielectric block are 690.00 × 690.00 × 250.00 mm. A schematic of the simulation model is shown in Figure 1.

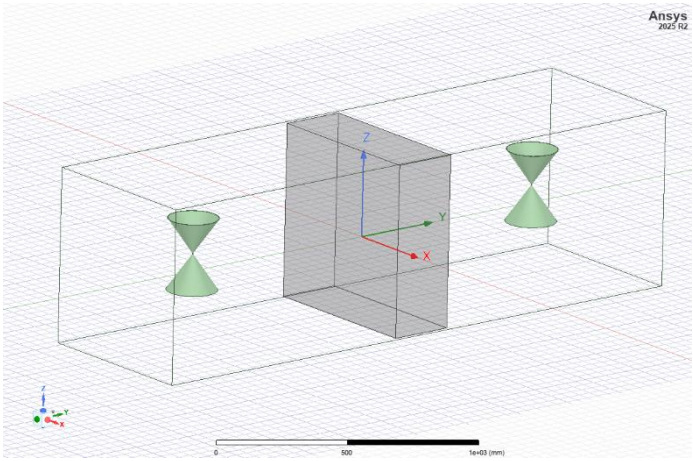


Figure 1. Simulation model consisting of transmitting and receiving conical dipole antennas with an inserted building material.

The electromagnetic parameters of the dielectric block were defined in accordance with ITU-R Recommendation P.2040-4, which provides reference values and models for the electromagnetic properties of building materials over a broad frequency range. In this study, the values of relative permittivity were determined using the recommended expressions in [17], and are given by (1):

$$\varepsilon_r = a \cdot f^b. \quad (1)$$

where:

f is the frequency in GHz, and a and b are material-dependent coefficients defined in [17].

Specifically, the parameters for concrete were considered in the frequency range from 1.00 GHz to 100.00 GHz, while the corresponding parameters for brick were taken in the range from 1.00 GHz to 40.00 GHz, following the applicability limits defined in the recommendation. These reference values formed the basis for constructing the dielectric material models used in the numerical simulations.

The adopted electromagnetic parameters of the materials investigated are summarised in Table 1.

Table 1. Electromagnetic parameters of the investigated materials.

EM parameters	Concrete	Brick
ε_r	5.24	3.91
ρ, kg/m^3	2400.00	1900.00
σ, S/m	0.00	0.00
tan δ	0.02 - 0.08	0.02 - 0.08

The electromagnetic parameters in Table 1 were used to define the properties of the materials investigated in the numerical model. The relative permittivity values were assumed constant, while the loss tangent was varied to represent different moisture conditions, from low to high levels. This approach enables a systematic evaluation of the influence of material losses on the transmission coefficient S_{21}.

It should be noted that the electromagnetic parameters used in this study are based on ITU-R P.2040-4, which defines their applicability primarily for frequencies above 1.00 GHz. However, in this work, these expressions were extended to lower frequencies (down to 0.10 GHz) to enable continuous analysis across the entire considered frequency range.

This extension is justified because, for the materials investigated, the variation of material parameters in the lower frequency range is relatively moderate. The adopted approach primarily aims to provide a comparative and qualitative assessment of transmission behavior rather than an exact material characterization. Therefore, the applied approximation does not affect the validity of the observed trends and conclusions.

3. Results and Discussion

This section presents the analysis of the transmission coefficient S_{21} for the investigated building materials in the frequency range 0.10 GHz to 5.00 GHz. Results are provided for

both concrete and brick under different electromagnetic conditions, with particular emphasis on the influence of material losses.

First, the transmission characteristics of concrete are analyzed, with the loss tangent varied in discrete steps (tan δ = 0.02, 0.05, and 0.08) to represent different moisture conditions. The corresponding results for brick are then presented under the same conditions.

Finally, a direct comparison between the two materials is provided by plotting the transmission coefficient for both concrete and brick on a single graph for the case of low moisture content (tan δ = 0.02), representing typical dry material conditions.

Figure 2 shows the transmission coefficient S_{21} of the electromagnetic wave propagating through a concrete slab for different values of the loss tangent, corresponding to varying moisture conditions. The results are presented for the frequency range 0.10 GHz to 5.00 GHz.

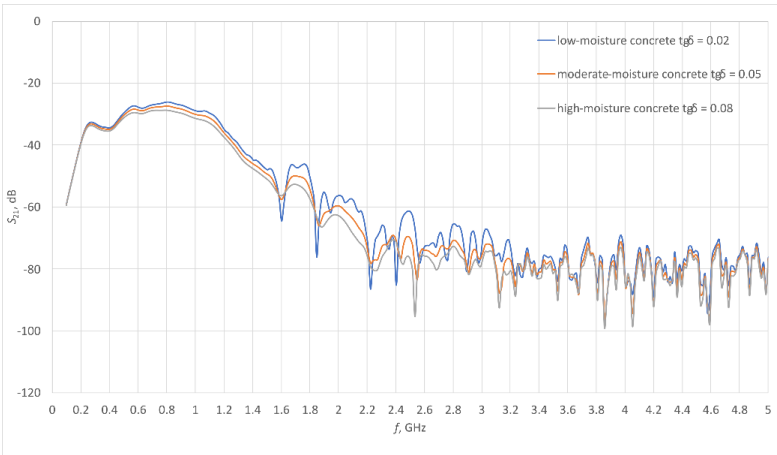


Figure 2. Transmission coefficient S_{21} of electromagnetic waves through a concrete slab for different moisture conditions (tan δ = 0.02, 0.05, 0.08).

The transmission coefficient S_{21} generally decreases with increasing frequency, with noticeable fluctuations caused by interference effects within the medium. Additionally, an increase in the loss tangent results in a systematic reduction in S_{21}, indicating greater electromagnetic attenuation as the material becomes more lossy.

This behavior is physically expected, as higher loss tangent values correspond to increased dielectric losses, resulting in greater energy dissipation within the material. Consequently, less electromagnetic energy reaches the receiving antenna, which is reflected in lower S_{21} values.

Table 2 summarises the transmission coefficient S_{21} values for selected frequencies of practical interest, corresponding to common communication systems. The results are presented for different moisture conditions in concrete, represented by varying loss tangent values.

Table 2. Transmission coefficient S_{21} for concrete at selected frequencies for different moisture conditions (tan δ = 0.02, 0.05, 0.08).

***f*, GHz**	**S_{21} (concrete with low moisture content), dB**	**S_{21} (concrete with moderate moisture content), dB**	**S_{21} (concrete with high moisture content), dB**	**Application**
0.10	-59.17	-59.31	-59.45	FM
0.40	-34.39	-34.93	-35.47	Satellite
0.70	-26.93	-27.85	-28.81	5G NR
0.79	-26.19	-27.47	-28.72	DVB-T2
0.87	-26.71	-28.03	-29.33	LoRa
1.80	-50.01	-54.05	-57.17	GSM
3.60	-73.83	-75.69	-77.41	5G NR

The results clearly show that the transmission coefficient S_{21} decreases as the loss tangent increases across all frequencies considered, confirming that higher moisture content leads to greater electromagnetic attenuation.

At lower frequencies (e.g., 0.10 GHz), the variation in S_{21} with moisture is relatively small (approximately 0.30 dB), indicating limited sensitivity of wave attenuation to dielectric losses in this range. In contrast, at higher frequencies, the effect becomes much more pronounced. For example, at 1.80 GHz (GSM band), the difference between low- and high-moisture conditions exceeds 7.00 dB, while at 3.60 GHz (5G band), the attenuation difference is greater than 3.50 dB. This trend is explained by the frequency-dependent nature of dielectric losses, where higher frequencies result in stronger interaction between the electromagnetic wave and the material, leading to increased energy dissipation. Additionally, frequencies used in modern communication systems (e.g., 5G and GSM) are more affected by moisture variations, highlighting the importance of material properties in designing environments with controlled electromagnetic propagation characteristics.

Following the analysis of concrete, the focus now shifts to brick as a representative building material. In particular, the influence of moisture content on electromagnetic wave transmission is investigated in the same way, by analyzing the variation of the transmission coefficient S_{21} with increasing loss tangent tan δ. Figure 3 shows the transmission coefficient S_{21} for brick under different moisture conditions, represented by varying values of the loss tangent (tan δ = 0.02, 0.05, and 0.08), in the frequency range 0.10 GHz to 5.00 GHz.

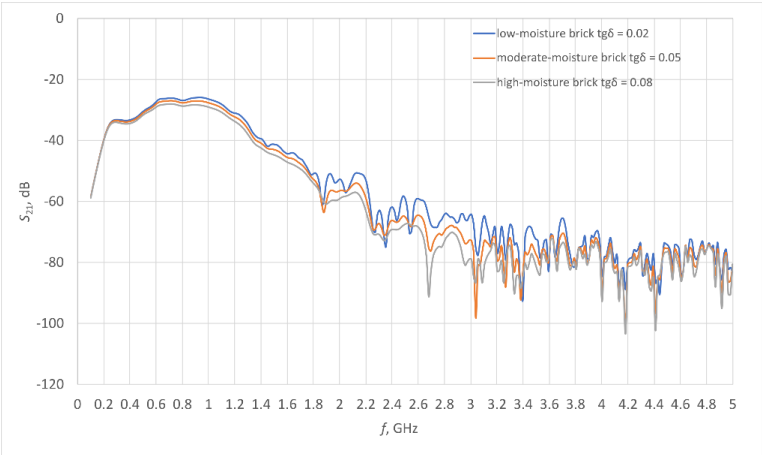


Figure 3. Transmission coefficient S_{21} of electromagnetic waves through a brick slab for different moisture conditions (tan δ = 0.02, 0.05, 0.08).

The results show a consistent decrease in the transmission coefficient S_{21} as the loss tangent increases, confirming that higher moisture content causes greater attenuation of electromagnetic waves in brick. However, compared to concrete, the differences between the curves are slightly less marked, indicating that brick is less sensitive to moisture-induced dielectric losses.

The effect of moisture becomes more apparent at higher frequencies, where the separation between the curves increases, particularly above approximately 2.00 GHz. This behavior is linked to the greater interaction between the electromagnetic field and the medium, resulting in higher energy dissipation within the material.

Furthermore, the fluctuations observed in the S_{21} response can be attributed to multiple reflections and interference effects within the material. These effects are more pronounced at higher frequencies, where shorter wavelengths enhance the formation of standing wave patterns inside the material.

Table 3 presents the transmission coefficient S_{21} values for brick at selected frequencies relevant to typical communication systems. The results are provided for different moisture conditions, represented by low, moderate, and high loss tangent values.

Table 3. Transmission coefficient S_{21} of brick at selected frequencies for different moisture conditions corresponding to typical communication systems.

***f*, GHz**	**S_{21} (brick with low moisture content), dB**	**S_{21} (brick with moderate moisture content), dB**	**S_{21} (brick with high moisture content), dB**	**Application**
0.10	-58.47	-58.60	-58.74	FM
0.40	-33.06	-33.65	-34.23	Satellite
0.70	-26.06	-27.01	-27.96	5G NR
0.79	-26.72	-27.64	-28.58	DVB-T2
0.87	-26.09	-27.21	-28.32	LoRa
1.80	-50.87	-52.71	-53.90	GSM
3.60	-70.73	-71.60	-72.47	5G NR

The results show that the transmission coefficient S_{21} decreases as moisture content increases across all frequencies considered, confirming the influence of dielectric losses on electromagnetic wave attenuation in brick. Compared to concrete, the variation of S_{21} with moisture is slightly less pronounced, indicating that brick is less sensitive to moisture-induced losses. However, the effect becomes more noticeable at higher frequencies, particularly in bands used by modern communication systems such as GSM and 5G. This behavior suggests that, although brick generally allows higher transmission than concrete, moisture still plays a significant role in determining its electromagnetic attenuation properties.

To provide a clear comparison between commonly used building materials, it is necessary to analyze their transmission behavior under identical electromagnetic conditions. Therefore, both materials are evaluated at the same value of the loss tangent, corresponding to low-moisture conditions, which represent typical operating environments.

This comparison enables the isolation of intrinsic material properties, eliminating the influence of varying electromagnetic parameters and allowing a direct assessment of how concrete and brick differ in their interaction with electromagnetic waves. This approach is particularly important for practical applications, where material selection plays a key role in controlling electromagnetic wave propagation in indoor environments.

Figure 4 presents a direct comparison of the transmission coefficient S_{21} for concrete and brick under identical electromagnetic conditions, corresponding to low moisture content (tan δ = 0.02). This comparison isolates the influence of material properties on electromagnetic wave transmission.

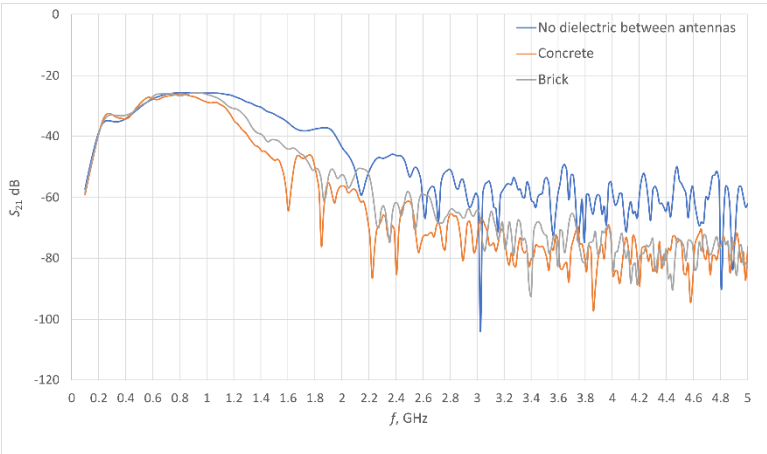


Figure 4. Comparison of the transmission coefficient S_{21} for concrete and brick under low-moisture conditions (tan δ = 0.02).

The results clearly show that concrete exhibits lower S_{21} values across the observed frequency range than brick, indicating stronger attenuation of the electromagnetic wave. This behavior is primarily due to the higher relative permittivity of concrete, which leads to increased reflection and absorption of electromagnetic energy within the material.

The difference between the two materials becomes more pronounced at higher frequencies, where the interaction between the electromagnetic wave and the medium is stronger. In this region, the influence of material properties on wave propagation is more significant, resulting in greater attenuation differences between concrete and brick.

Although both materials show similar trends in frequency-dependent fluctuations due to multiple reflections and interference effects, brick generally allows greater transmission of electromagnetic energy. This suggests that, under comparable conditions, brick provides lower electromagnetic shielding effectiveness than concrete.

In addition to the comparison between concrete and brick, Figure 4 also includes the reference case of free-space propagation, shown by the blue curve. This case represents the absence of any dielectric slab between the transmitting and receiving antennas.

It is clear that both materials reduce the transmission coefficient S_{21} compared to the free-space case across the entire analyzed frequency range. This confirms that inserting a block into the propagation path causes additional attenuation of the electromagnetic wave due to reflection, absorption, and energy dissipation within the material.

Furthermore, the free-space response is generally higher than those for concrete and brick, indicating that a greater portion of electromagnetic energy reaches the receiving antenna when no obstacle is present. When a material is introduced, part of the incident energy is reflected at the air–material interface, while another part is attenuated during propagation through the medium. As a result, both concrete and brick act as passive barriers that reduce the transmitted field relative to the free-space configuration.

Table 4. Comparison of the average transmission coefficient S_{21} over the entire frequency range (0.10–5.00 GHz) for free space and the investigated building materials.

Case	**Average S_{21}, dB**	**ΔS_{21} vs free space, dB**
Free space	-48.23	0.00
Brick	-57.81	-9.58
Concrete	-61.04	-12.81

The results in Table 4 clearly show that the highest transmission occurs in the free-space case, where no material is present between the antennas. Introducing a slab causes a significant reduction in the average S_{21} value, confirming additional attenuation of the electromagnetic wave. A comparison of the materials, based on the average values of the transmission coefficient S_{21} calculated over the entire frequency range (0.10–5.00 GHz), shows that brick exhibits higher average S_{21} values (−57.81 dB) than concrete (−61.04 dB), indicating that brick allows greater transmission of electromagnetic energy. In contrast, concrete produces the strongest attenuation, with an additional reduction of approximately 12.80 dB compared to free-space propagation. The observed attenuation differences, on the order of 10–13 dB, are significant in practical communication scenarios, particularly in indoor environments where material-induced losses directly affect signal coverage and quality. These results confirm that the electromagnetic properties of the investigated materials, particularly their relative permittivity and dielectric losses, play a crucial role in

wave attenuation. The observed differences are consistent with previous findings and demonstrate that concrete provides higher electromagnetic shielding effectiveness than brick under identical conditions.

4. Conclusion

This paper presents a numerical investigation of electromagnetic wave transmission through two representative modern building materials, concrete and brick, with particular emphasis on the transmission coefficient S_{21}. The analysis was conducted in the frequency range from 0.10 GHz to 5.00 GHz using a full-wave simulation model.

The results clearly demonstrate that the presence of building material significantly reduces electromagnetic wave transmission compared to free-space propagation. The average S_{21} value for free space was approximately −48.23 dB, while the introduction of brick and concrete resulted in additional attenuation of about 9.60 dB and 12.80 dB, respectively. These results confirm that concrete exhibits stronger electromagnetic attenuation and therefore higher shielding capability than brick.

Furthermore, the influence of moisture content, modelled through variations in the loss tangent (tan δ = 0.02–0.08), was shown to have a notable impact on transmission behavior. Increasing moisture leads to a consistent decrease in S_{21} across all frequencies, with the effect becoming more pronounced at higher frequencies. For example, at 1.80 GHz, the difference between low- and high-moisture conditions exceeds several decibels, highlighting the sensitivity of electromagnetic wave propagation to material losses.

The comparative analysis under identical conditions revealed that differences in electromagnetic behavior are primarily governed by EM properties. While both materials exhibit similar frequency-dependent trends, concrete consistently provides greater attenuation, whereas brick allows higher transmission of electromagnetic energy.

The results emphasize the importance of material selection in the design of indoor environments with controlled electromagnetic propagation characteristics, particularly for modern communication systems such as GSM and 5G. The findings provide a useful basis for further research aimed at optimizing material properties for improved electromagnetic shielding performance.

5. References

[1] Křivánek, Ivo. Dielectric Properties of Materials at Microwave Frequencies // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 56(2008), 5; 125–132. DOI: 10.11118/actaun200856050125.

[2] Fenske, Kurt; Misra, Devendra. Dielectric Materials at Microwave Frequencies // Applied Microwave and Wireless, 14(2002), 6; 92–100.

[3] Rupčić, Slavko; Mandrić, Vanja; Kraus, Ivan; Kovačić, Đurđica. Measuring Electromagnetic Wave Propagation Transmission Parameters Through Traditionally Constructed Buildings // Sustainability, 17(2025), 3; 1232, 16. DOI: 10.3390/su17031232.

[4] Rupčić, Slavko; Mandrić, Vanja; Kovačić, Đurđica; Varga, Maja. Measurements of Electromagnetic Radiation Propagation through Biomaterial Samples Based on Harvest Residues // Sustainability, 16(2024), 2; 499–515. DOI: 10.3390/su16020499.

[5] Halabe, Udaya B.; Sotoodehnia, Arash; Maser, Kenneth R.; Kausel, Eduardo A. Modeling of the Electromagnetic Properties of Concrete // ACI Materials Journal, 90(1993), 6; 552–563. DOI: 10.14359/4495.
[6] Stone, William C. Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials // NIST Interagency/Internal Report, NISTIR 6055, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1997. DOI: 10.6028/NIST.IR.6055.
[7] Shaw, Marcus R. The Permittivity and Conductivity of Concretes at Ground-Penetrating Radar Frequencies // Advances in Cement Research, 10(1998), 4; 187–194. DOI: 10.1680/adcr.1998.10.4.187.
[8] Soutsos, Marios N.; Bungey, John H.; Millard, Stephen G.; Shaw, Marcus R.; Patterson, A. Dielectric Properties of Concrete and Their Influence on Radar Testing // NDT & E International, 34(2001), 6; 419–425. DOI: 10.1016/S0963-8695(01)00009-3.
[9] Demirci, Şevket; Yılmaz, Betül; Işıker, Hakan; Özdemir, Caner. Determination of Electromagnetic Attenuation Characterization of Some Hollow Building Materials Based on Free-Space Transmission Measurements at Lower Microwave Frequency Band // Measurement, 253(2025), Part B; 117586. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.117586.
[10] Balanis, Constantine A. Advanced Engineering Electromagnetics. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2012. (ISBN 978-0471739067)
[11] Rappaport, Theodore S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. (ISBN 978-0130422323)
[12] Holloway, Christopher L.; Perini, Patrick L.; DeLyser, Ronald R.; Allen, Kenneth C. A Study of the Electromagnetic Properties of Concrete Block Walls for Short Path Propagation Modeling. Boulder: National Telecommunications and Information Administration, Institute for Telecommunication Sciences, U.S. Department of Commerce, October 1995.
[13] Vizi, Gergely Norbert; Vandenbosch, Guy A. E. Building Materials and Electromagnetic Radiation: The Role of Material and Shape // Journal of Building Engineering, 5(2016); 96–103. DOI: 10.1016/j.jobe.2015.11.010.
[14] Zhekov, Stanislav Stefanov; Franek, Ondrej; Pedersen, Gert Frølund. Dielectric Properties of Common Building Materials for Ultrawideband Propagation Studies // IEEE Antennas and Propagation Magazine, 62(2020), 1; 72–81. DOI: 10.1109/MAP.2019.2955680.
[15] Dinh, Tin Trong; Hegler, Sebastian; Liebscher, Marco; Navarro de Sosa, Iñaki; Li, Huanyu; Plettemeier, Dirk; Drossel, Welf-Guntram; Mechtcherine, Viktor. Dielectric Material Characterization of Concrete in GHz Range in Dependence on Pore Volume and Water Content // Construction and Building Materials, 311(2021); 125234. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125234.
[16] von Hippel, Arthur Robert (ur.). Dielectric Materials and Applications. Cambridge, MA: MIT Press, 1954.
[17] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R). Effects of Building Materials and Structures on Radio-Wave Propagation in the Range of 1 MHz to 450 GHz // Recommendation ITU-R P.2040-4, Geneva, 2025.

Opasnost urbanih poplava slavonske Podravine
Hazard of urban flood in slavonian Podravina

S. Maričić[1,*], L. Iličić[2]

[1, 2] Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, R. Hrvatska

[*] e-mail: smaricic@gfos.hr

Sažetak

Urbane poplave sve se češće pojavljuju u meteorološkim izvještajima. Uglavnom se pripisuju klimatskim varijacijama, tj. sve češćoj pojavi lokalnih intenzivnih oborina. Uz to, uočen je i velik utjecaj urbanizacijskih promjena. Širenje nepropusnijih površina, koje povećava vršne protoke otjecanja, uz podzemne kanalizacijske odvodne cijevi manjeg, ograničenog kapaciteta, onemogućuju efikasnu odvodnju. Posljedica je razlijevanje vode po urbanim zonama koje najčašće uzrokuje velike štete.

U radu se razmatraju oborine zabilježene u gradovima slavonske Podravine – Virovitici, Donjem Miholjcu i Osijeku. Obradom dnevnih podataka tražila se potvrda klimatskih promjena i elaborirana su povećanja „poplavno opasnih“ kiša – jednodnevnih i dvodnevnih kiša većih od 40 mm/m^2, odnosno 60 mm/m^2.

U drugom dijelu rada predstavljeni su neki kišni događaji zabilježeni ombrografski (kontinuirano). Sa desetak zabilježenih kišnih hidrograma razmatranog područja ukazuje se na osobine intenzivnih pljuskova. Nadalje, takvim kišama je analizirano otjecanje sa imaginarnog urbanog područja u dva reprezentativna vremenska razdoblja – prvom, u nastajanju gradske sredine i drugom, nakon njene intenzivne urbanizacije. Sustav odvodnje je modeliran u SWIMM programskom paketu te je pokazao kako je efikasan kanalizacijski sustav, zbog neprimjerenog razvoja, postao nedovoljno efikasan i poplavno ugrožavajući.

Ključne riječi: Podravina, klimatske promjene, intenzivne kiše, urbane poplave

Abstract

Urban floods are increasingly appearing in meteorological reports. They are mainly attributed to climate variations, i.e. the increasingly frequent occurrence of local intense precipitation. In addition, a significant impact of urbanization changes has been observed. The expansion of impervious surfaces, which increases peak runoff flows, along with underground sewage pipes of smaller, limited capacity, prevent efficient drainage. The result is water spilling over urban areas, which most often causes major damage.

The paper examines precipitation recorded in the cities of Slavonian Podravina – Virovitica, Donji Miholjac and Osijek. By processing daily data, confirmation of climate change was

sought and increases in “flood-dangerous” rain – one-day and two-day rains exceeding 40 mm/m^2, or 60 mm/m^2, were elaborated.
The second part of the paper presents some rain events recorded by ombrography (continuously). With a dozen recorded rain hydrographs of the considered area, the characteristics of intense showers are indicated. Furthermore, such rains were used to analyze the runoff from an imaginary urban area in two representative time periods – the first, in the emergence of the urban environment and the second, after its intensive urbanization. The drainage system was modeled in the SWIMM program package and showed how an efficient sewage system, due to inappropriate development, became insufficiently efficient and flood-prone.

Key words: Podravina, climate change, intense rains, urban flooding

1. Uvod

Zanimanje za klimatske promjene potakao je švedski znanstvenik Svante Arrhenius koji je 1896. godine prvi predvidio da će doći do globalnog zatopljenja. Iako su se klimatske promjene dešavale kroz čitavu povijest, globalno zatopljenje današnjice započelo je sredinom XIX. stoljeća sa industrijskom revolucijom (otkrićem parnog stroja), a intenzivira ga sve veće korištenje fosilnih goriva (jer se prilikom izgaranja fosilnih goriva u atmosferu ispuštaju staklenički plinovi koji pojačavaju djelovanje efekta staklenika). Godine 1988. u Ujedinjenim narodima osnovan je Međuvladin panel o klimatskim promjenama (The Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC). Zadaća tog tijela je kreiranje izvješća o klimatskim promjenama i davanje prijedloga kako ublažiti klimatske promjene ili smanjiti njihov utjecaj na prirodu. Od tada se klimatske promjene globalno istražuju, organiziraju se zajednički rasprave, traže usuglašeni pristupi i mehanizmi djelovanja. [1]
Klima predstavlja prosječne vremenske prilike (temperatura, oborine, tlak i drugo) izražene pomoću srednjih vrijednosti, ekstrema i varijabilnosti vremenskih veličina, za duže, najčešće 30-godišnje razdoblje. Klima se prostorno razlikuje. Na užem prostoru klimatske osobine određuju zemljopisni položaj (ukazuje na Sunčevo dozračivanje), reljef (forma, nadmorska visina), morske i ledene površine okruženja te stanje tla (sastav, vlažnost i vegetacija). Klima se mijenja i u vremenu pa je zamjetna sezonska i višegodišnja različitost. Posljedica je to prirodnih procesa prvenstveno planetarnih gibanja, vulkanskih erupcija i oscilacija Sunčevog zračenja. Erupcijom vulkana onečišćuje se atmosfra plinovima i česticama koje izbacuje vulkan, smanjuje se prodiranje sunčevih zraka te uništava ozonska ovojnica. Sunce, glavni izvor energije za Zemlju, ima periodične promjene svoje aktivnosti pri čemu se mijenja i dolazna energija na Zemlju. Tzv. sunčeve pjege su indikator najpoznatije oscilacije Sunca i javljaju se u ciklusima od jedanaest godina Kad su najizraženije dolazi do zahlađenja dijela oceana i povećanja oborina. [2 - 5]
Statistički značajne promjene srednjeg stanja ili sezonske varijabilnosti klimatskih veličina, kao i pojavnosti ekstrema, koje traju desetljećima i duže, predstavljaju i nazivaju se klimatskom promjenom. [2]
U znanstvenim i u političkim krugovima, ali i kod pojedinaca, sve je više istaknuto pitanje o rizicima koje donose klimatske promjene. Kako je rizik vjerojatnost da se dogodi nešto loše

s određenim posljedicama, tako se na temelju stavova, prosudbe, osjećaja prema tim posljedicama stvara percepcija rizika. Rizici klimatskih promjena su brojni: uništenje infrastrukture i kulturno-povijesne baštine ekstremnim vremenskim prilikama, gubitak bioraznolikosti, nemogućnost održivog uzgoja usjeva uz pomanjkanje hrane i gladi, izravni i neizravni ekonomski gubitci, pomanjkanje vodnih resursa, otapanje ledenjaka, podizanje morske razine, migracije stanovništva, utjecaj vremenskih varijacija na mentalno i fizičko zdravlje ljudi, proširenje zaraznih bolesti i drugo. [6 - 9]

Na ponašanje ljudi prema rizicima utječu njihova iskustava i prosudbe proizašle iz medijskih opisa promjena, nezgoda i katastrofa. Od utjecaja su znanje o riziku, strah od rizika, ekonomske i društvene posljedice od rizika, smrtni slučajevi povezane sa tim rizikom i slično, a na temelju tih stavaka ljudi odlučuju kako i na koji način reagirati na rizik, ali i kako njime upravljati. [10]

Poplave, jedna od čestih i razornih prirodnih katastrofa, pogađaju više ljudi u svijetu nego bilo koja druga vrsta nepogoda. Od 2000. do 2023. godine, broj svjetskih poplava povećao se za više od 130% u odnosu na prethodna dva desetljeća. S obzirom na uočene promjene u karakteristikama poplava, za prilagodbu je potreban holistički pristup koji kombinira strukturna i nestrukturna rješenja. Najvažniji elementi su mu: jačanje sposobnosti predviđanja i ranog upozoravanja, adaptivno prostorno planiranje i upravljanje te rješenja temeljena na prirodi. [11-13]

Ovim radom želi se provjeriti da li se elementi klimatskih promjena mogu konstatirati pomoću meteoroloških podataka slavonske Podravine. Zatim se, s obzirom na uočene rizike (poplavne probleme), daje osvrt na uzročno-posljedične elemente kanalizacijskog odvodnog sustava urbane sredine. .

2. Oborine slavonske Posavine

2.1. Obuhvat istraživanja

Istraživanje je usmjereno na Slavoniju, a odabrano je područje Podravine i to najnizvodnijeg dijela hrvatskog priobalja rijeke Drave. Ovdje rijeka Drava razdvaja Hrvatsku i Mađarsku, a zakretanjem prema jugu, čijni granicu hrvatskih regija Baranje i Slavonije.

Tu su prisutna meteorološka mjerenja, među kojima su i mjerenja oborina. Prikladno su odabrane postaje uz gradska središta i to Virovitica, Donji Miholjac i Osijek. Radi se o donekle različitim mjernim postajama. Virovitica i Donji Miholjac su klimatološke (obične) meteo-postaje (KMP), dok je Osijek glavna meteorološka postaja (GMP). U prve dvije motrenja obavljaju neprofesionalni motritelji, tri puta dnevno (u 07, 14 i 21 sat), a postaje su najčešće smještene unutar privatnih posjeda. Podatci se dostavljaju dnevno/mjesečno telefonski/poštom, a DHMZ ih kontrolira i arhivira za daljnje korištenje. Za Osijek je, u obližnjem Čepinu, uspostavljena glavna meteorološka postaja, s profesionalnim motriteljima i ograđenim radnim prostorom. Podatci se mjere i proslijeđuju tijekom 24 sata pomoću globalnog telekomunikacijskog sustava prema svjetskim propisima, a stalno se obavlja i operativna kontrola.

Za razliku od postaje u Miholjcu, u ostale dvije postaje provodi se i ombrografko motrenje. U Virovitici je klasični ombrograf - instrument koji neprekidno bilježi količinu i trajanje svih vrsta oborine. Radi se o Hellmannovom ombrografu (pluviografu) s grijanjem (kako bi

prikupljali podatci u svim vremenskim uvjetima), a instrument radi na principu plovka (plivača) sa mehanizmom za bilježenje promjene razine na pokretnu traku s koje se iščitavaju podatci o promjenama količine oborine tijekom vremena. U Osijeku je instaliran automatski ombrograf, samostalniji mjerni uređaj koji obavlja mjerenje količine oborine kontinuirano tijekom 24 sata. Izmjerene količine se arhiviraju na medijima za računalnu obradu i dostupni su u realnom vremenu (svakih deset minuta).
Za razmatranje oborina predmetnog područja pribavljeni su podatci od DHMZ-a. Dostupni su bili podatci o dnevnim kišama poprilično dobrog vremenskog obuhvata. Za Viroviticu se raspolagalo s dnevnim kišama razdoblja od 1960. godine do 1996. te od 2007. do 2024. godine uz nedostatak kiša XII. mjeseca 1961. te I. – IV. 1962., zatim X. mjeseca 1965. i IV. – XII. 1996. kao i I. – V. mjeseca 2007. godine. Od ožujka 2024. više nema podataka o kišama za ovu postaju. Za Donji Miholjac na raspolaganju su bile dnevne kiše nešto kraćeg razdoblja, 1981. do 2025. godine, a nedostajali su samo podatci za IV. mjesec 2007. godine. Za područje Osijeka pribavljeni su podatci o dnevnim kišama razdoblja 1969. do 2025. godine uz manji nedostatak podataka za ratno razdoblje, X. – XII. mjesec 1991. i I. – II. mjesec 1992. godine.
Specifična problematika pljuskova (intenzivnih oborina) zahtijevala je podatke kontinuiranog mjerenje oborina na više bliskih lokacija pa su ovdje korišteni i rezultati ombrografskog praćenja oborina na pet lokacija područja Osijeka.

2.2. Odrednice analiza i kriteriji „poplavno opasnih“ oborina

S obzirom na različitu raspoloživost podataka po lokacijama izmjere, usvojeni su prikladni periodi respektabilnog fonda kišnih podataka za procjenu promjena kišnog režima, kao elementa klime. Tako su za Virovitičko područje razmatrana tri perioda sa po 17/18 godina, za okruženje Donjeg Miholjaca usvojena su dva perioda sa po 22/23 godine, a za područje Osijeka usvojena su također dva perioda sa po 28/29 godina. Tako su se mogli odrediti statistički podatci ranijih perioda za usporedbu sa obilježjima suvremenijih perioda. Usvojena podjela vidljiva je u narednim tablicama. Za svaki period su određene prosječne godišnje količine oborina (srednjaci), maksimalne i minimalne vrijednosti po godinama, mjesecima i danima.
Kako je ovdje poseban interes prema kišama koje su mogle uzrokovati poplavne probleme odabrane su kiše za koje se može reći da su potencijalno „poplavno opasne“. Kriterij za to je izabran u smislu premašenja dnevne kiše od 40 litara po četvornom metru površine, tj. kiše od 40 mm. Dodatni kriterij je još opasnija kiša veća od 60 mm. Kako se neki kišni događaj može desiti i zabilježiti u dva dana, razmatrane su i dvodnevne kiše (zbroj dvaju uzastopnih dnevnih kiša). Naime, pribavljeni podatci su organizirani u obliku dnevnih zapisa, koji su rezultat svakodnevnog mjerenja, a daju se količine oborine u 24 satnom razdoblju: od 7 (8) sati jučer do 7 (8) sati danas prema zimskom (ljetnom) računanju vremenu. Tako je moguće da je neki oborinski događaj obuhvaćen u dva podatka, jer je trajao tijekom dva dana (dva mjerna razdoblja), pa su uzastopni dani s većim količinama oborine obuhvaćeni kao jedinstveni podatci o moguće opasnom oborinskim događajima. Dakle, u radu se ne promatraju samo isključivo jednodnevne kiše već i dvodnevne (zbroj dvaju uzastopnih dnevnih kiša).

2.3. Rezultati provedenih analiza

Prema ukupnom broju poplavno opasnih kiša, starijih i novijih perioda, neke lokacije može se ocijeniti trend promjena. Rezultati provedenih analiza dati su u narednim tablicama (tablica 1. - 6.) po obuhvaćenim lokacijama. Prve tri tablice donose statističke vrijednosti oborina, a druge tri zastupljenosti (broj pojava) poplavno opasnih kiša i njihove maksimume. Sve to je iskazano prema prikladno usvojenim periodima opažanja podataka. Općenito, iz njih je razvidno povećanje poplavne opasnosti jer se generalno u novije doba povećao broj opasnih kiša kao i iznosi njihovih ekstremnih, prije svega maksimalnih, pojava. Prosječna količina godišnje oborine malo se povećala na svim lokacijama (tablica 1. - 3.), dok je povećanje broja opasnih i iznosa maksimalnih kiša značajno (tablica 4. - 6.).

Tablica 1. Statističke oborine Virovitice za tri razdoblja opažanja

VIROVITICA - KARAKTERISTIČNE OBORINE (MM) TRIJU RAZDOBLJA				
razdoblje	opseg	sred. god.	max. god.	min. god.
1960.-1978. (-'62.)	18 god.	835,7	1114,8	552,6
1979.-1995.	17 god.	801,0	973,2	603,8
2008.-2023.	16 god.	889,9	1302,8	552,2
promjena	(%)	+ (6,5÷11,1)	+ (16,9÷33,9)	- (0,1÷8,5)

Tablica 2. Statističke oborine D. Miholjca za dva razdoblja opažanja

D. MIHOLJAC - KARAKT. KIŠE (MM) DVAJU RAZDOBLJA				
razdoblje	opseg	sred. god.	max. god.	min. god.
1981.-2003.	23 god.	711,9	968,1	393,9
2004.-2025.	22 god.	736,0	1117,6	432,7
promjena	(%)	+3,4	+15,4	+9,9

Tablica 3. Statističke oborine Osijeka za dva razdoblja opažanja

OSIJEK - KARAKT. OBORINE (MM) DVAJU RAZDOBLJA				
razdoblje	opseg	sred. god.	max. god.	min. god.
1969.-1997.	29 god.	659,5	884,7	466,9
1998.-2025.	28 god.	691,0	1038,2	317,0
promjena	(%)	+ 4,8	+ 17,4	- 47,3

Povećanje srednjih godišnjih oborina utvrđeno prema primjerenim razdobljima, tj. opsegu obuhvaćenih godina, za odabrane, različite lokacije, kreće se od 3,4% do 11,1%, što nije nešto značajno. Povećanje maksimalnih godišnjih oborina razmatranih lokacija utvrđeno je od 15,4% do 33,9%. Za drugi ekstrem, minimalne godišnje oborine općenito se može konstatirati smanjenje. Utvrđene vrijednosti promjene minimalne godišnje oborine kreću se od + 9,9% (povećanja), preko zanemarivih – 0,1% (stagnacije) do smanjenja od čak - 47,3%. Utvrđivanje broja moguće opasnih oborina za pojedina razdoblja načinjeno je grupiranjem u kategorije prema iznosu (>40mm i >60mm) i prema trajanju (jednodnevna i dvodnevna). Neka odstupanje od generalnog porasta, što broja opsnih kiša, što iznosa maksimalne, ne kvare opći dojam. Za virovitički kraj, u novije doba (2007.-2023.) nisu premašene maksimalne kiše iz prvog razdoblja (1960.-1978.), ali jesu za one drugog (1979.-1996.). Za donjomiholjački kraj nije evidentno povećanje jednodnevne kiše u novijem razdoblju, ali jeste

za dvodnevnu. Da ne zbuni promjena od -40% broja jednodnevnih kiša zabilježenih u D. Miholjcu, treba pojasniti da su te kiše obuhvaćene i u broju dvodnevnih, za koje je konstatirano znatno povećanje +85,7%. Za osječki kraj nedvojbeni su ukazi na povećanje opasnosti od urbanih poplava u novije doba.

Tablica 4. Broj moguće opasnih kiša i njihovi maksimumi - KMP Virovitica

VIROVITICA - KIŠE		> 40 mm		> 60 mm		maksimalna kiša	
razdoblje	opseg	1-dn.	2-dn.	1-dn.	2-dn.	1-dn.	2-dn.
1960.-1978.	18 g.	19	40	7	9	116,5	188,4
1979.-1996.	17 g.	19	40	0	7	59,5	83,1
2007.-2023.	16 g.	23	49	5	16	93	123,4
promjena	%	+ 21,1	+ 22,5	-28,6÷+	+(77,8÷128,6)	-20,2÷+56,3	-34,5÷+48,5

Tablica 5. Broj moguće opasnih kiša i njihovi maksimumi - D. Miholjac

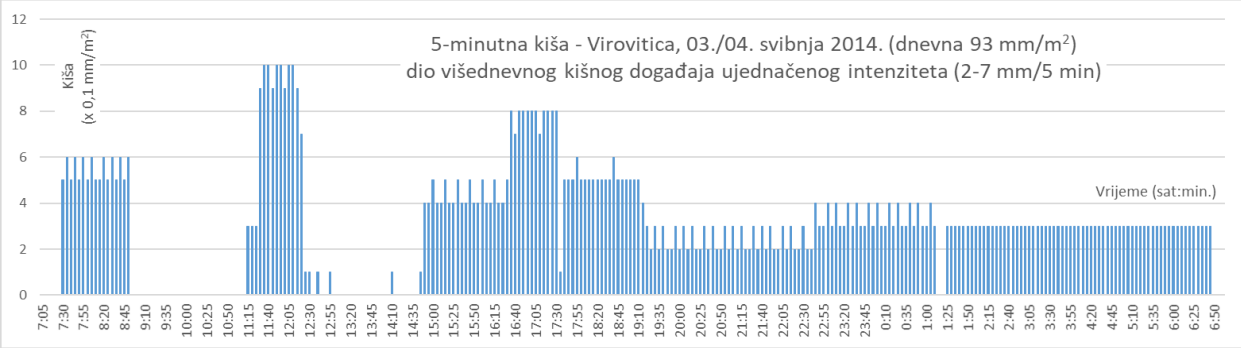
DONJI MIHOLJAC		> 40 mm		> 60 mm		max. kiša	
razdoblje	opseg	1-dn.	2-dn.	1-dn.	2-dn.	1-dn.	2-dn.
1981.-2003.	23 g.	14	34	5	7	108	108
2004.-2025.	22 g.	26	50	3	13	78	115,2
promjena	(%)	+ 85,7	+ 47,1	- 40	+ 85,7	- 27,8	+ 6,7

Tablica 6. Broj moguće opasnih kiša i njihovi maksimumi - GMP Osijek

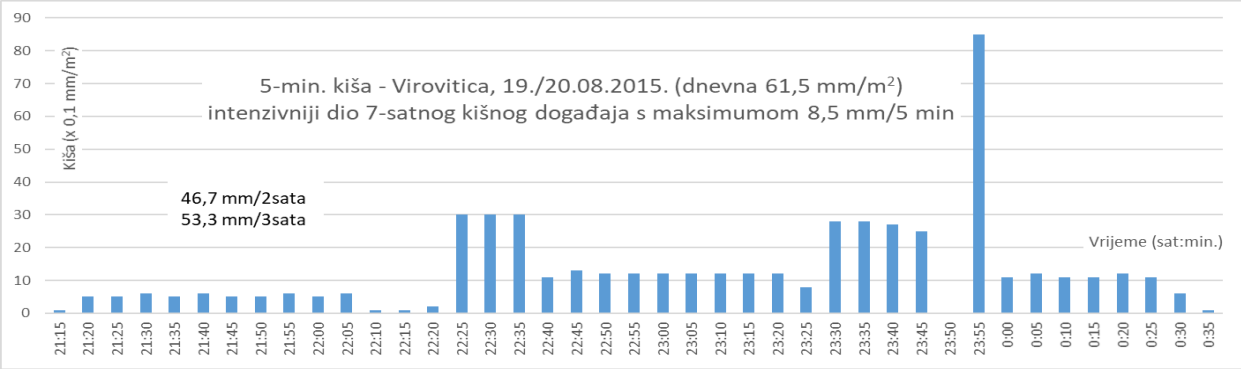
OSIJEK - OBORINE		> 40 mm		> 60 mm		max. kiša	
razdoblje	opseg	1-dn.	2-dn.	1-dn.	2-dn.	1-dn.	2-dn.
1969.-1997.	29 g.	15	19	3	7	85,7	93,5
1998.-2025.	28 g.	29	49	7	16	107,5	124,0
promjena	(%)	+93,3	+157,9	+133,3	+128,6	+25,4	+32,6

3. Osobine nekih izraženih pljuskova

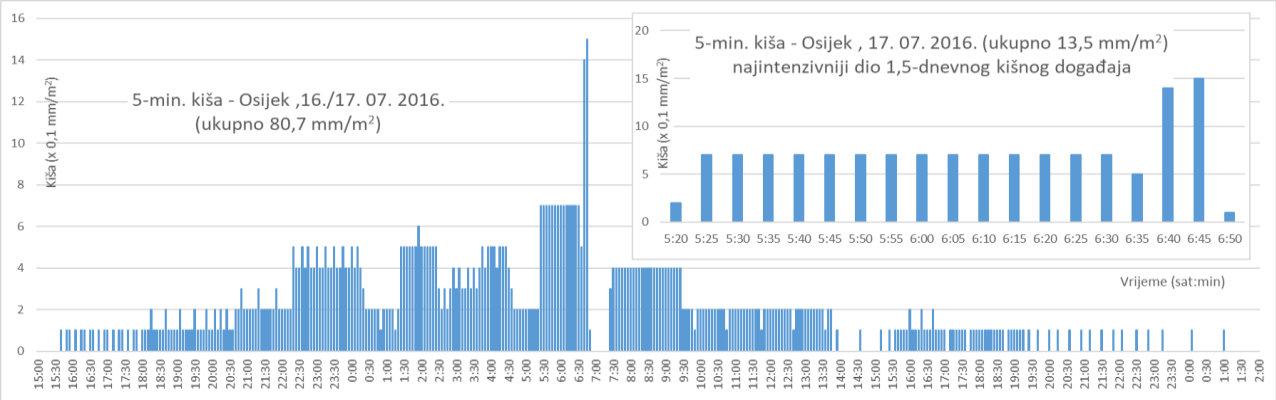
Prethodni dio rada je bio usmjeren na klimatološka obilježja razmatranog područja, a nadalje je interes usmjeren na konkretniju poplavnu opasnost uslijed intenzivnih kiša – pljuskova. Za ukazivanje na osobine konkretnih kiša, a koje se ne odražavaju u podatcima o dnevnim količinama oborina, trebalo je pribaviti podatke s kontinuiranim mjerenjem oborinskog događanja. Od DHMZ-a su zamoljeni zapisi o nekoliko kišnih događaja izmjereni na postajama u Virovitici i Osijeku. Pribavljeni su i predstavljeni u obliku 5-minutnih oborina, a histogrami su im dati na narednim slikama. Slika 1. prikazuje 24-satni dio kiše koja je padala u Virovitici tijekom više dana. Intenzitet joj je bio mali i varirao je oko 0,5 mm u 5 minuta, ali je dugo trajala te joj je dnevni iznos preko 90 mm/m^2. Slika 2. prikazuje jednu koncentriraniju (7-satnu) kišu iste lokacije, s jednom izraženom intenzivnom 5-minutnim epizodom od 8,5 mm/m^2. Tu se može uočiti velika količina kiše koja je pala u 2-3 sata. Na daljnjim slikama su kiše registrirane u Osijeku. Na GMP Osijek (Čepin) u srpnju 2016. tijekom dva dana evidentirana je kiša data na slici 3. Ona je na baznom dijelu slike prikazana tijekom ukupnog trajanja (s uzlaznim i silaznim intenzitetima), a posebno je izdvojen njen najintenzivniji dio od oko 1,5 sat pri čemu je palo oko 13,5 mm/m^2 kiše. Slika 4. donosi jedan jači pljusak. U poludnevnoj kiši iz srpnja 2016. ističe se pljusak u kojem je palo oko 33 mm kiše u pola sata.



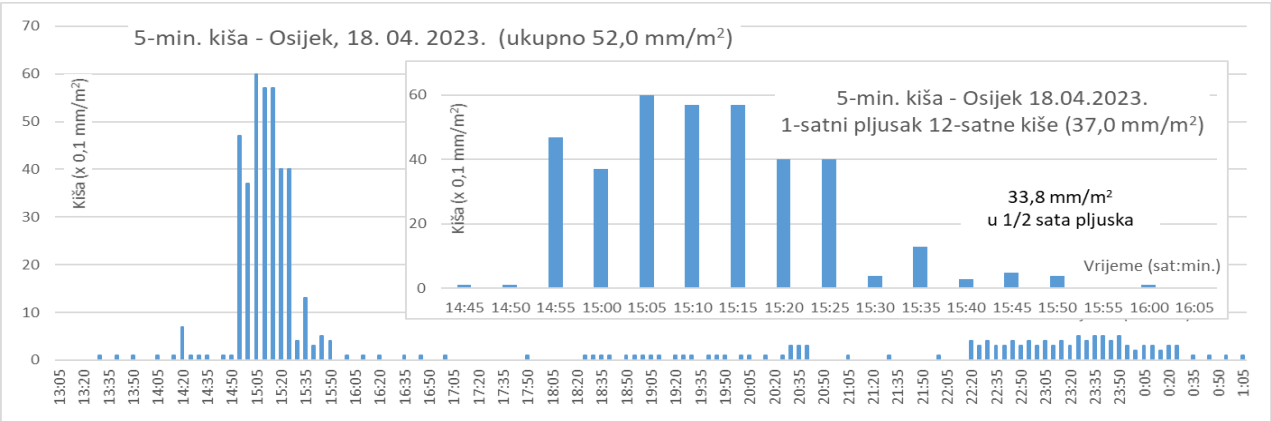
Slika 1. Primjer ujednačene višednevne kiše u Virovitici, svibnja 2014.



Slika 2. Koncentriranija kiša velikog intenziteta u par sati – Virovitica, kolovoza 2015.

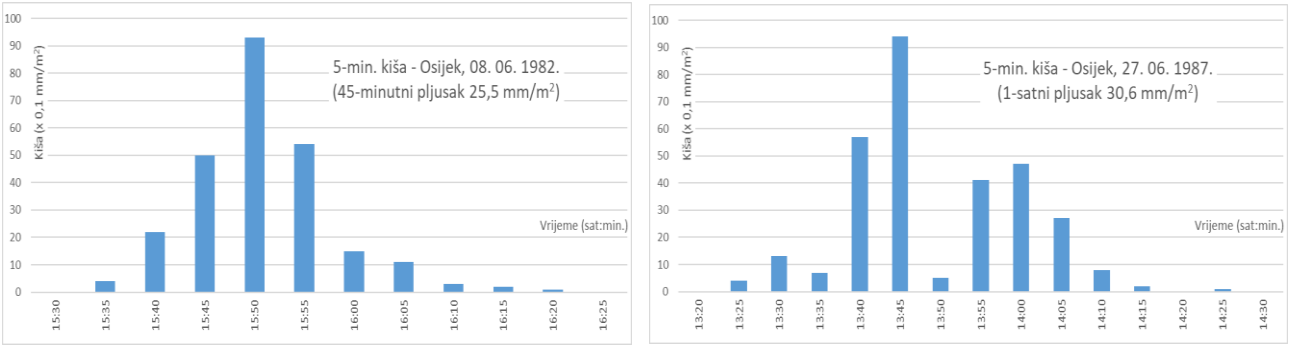


Slika 3. Kiša evidentirana u dva dana u Osijeku srpnja 2016. i njen intenzivniji jutarnji dio

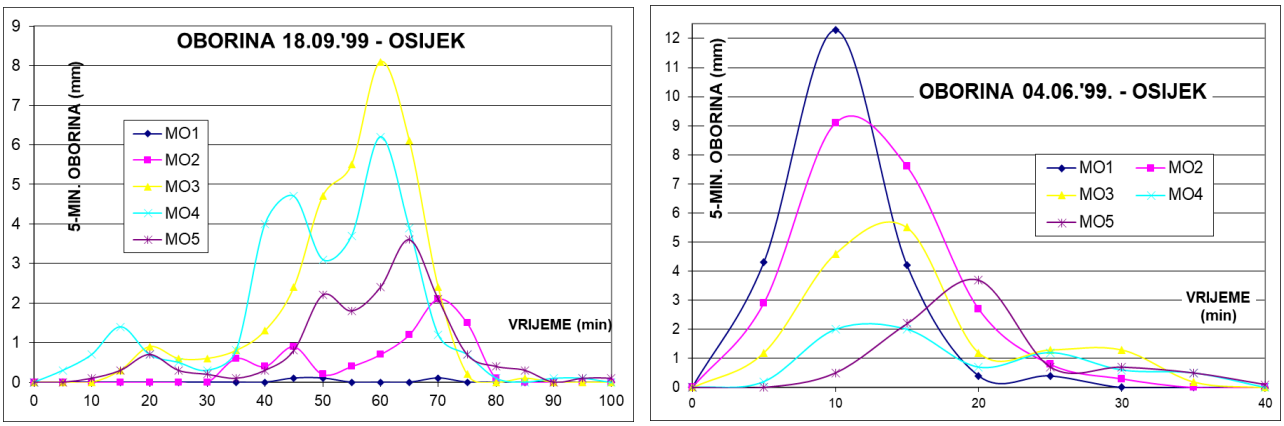


Slika 4. Kiša evidentirana 18. 04. 2023. na GMP Osijek s izraženim jakim pljuskom

Na dvodijelnoj slici 5. prikazani su neki intenzivniji pljuskovi prema podatcima DHMZ-a za Osijek. Prvi je iz lipnja 1982. godine, a drugi iz lipnja 1987. te oba su trajanja manje od sata sa količinom kiše od preko 25 mm/m^2. Sa narednim grafovima slike 6. se ukazuje na elemente prostorne raspodjele pojedinog kišnog događaja. Za to su preuzeti rezultati opažanja kiša ombrografima raspoređenim po gradskoj površini Osijeka. Također su dati pomoću 5-minutnih oborina te se može uočiti da pljuskovi često imaju različite intenzitete i količine na relativno bliskim lokacijama. Najveći intenzitet vidljiv je na desnom grafu u iznosu kiše od preko 12 mm/m^2 u 5 minuta padanja. [14]



Slika 5. Intenzivniji, pravilnije oblikovani pljuskovi Osijeka iz 80-tih godina (DHMZ)

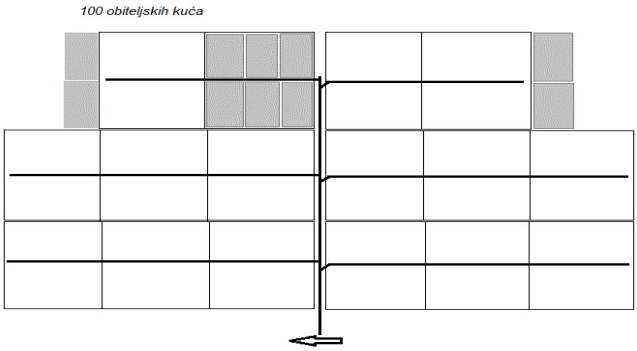


Slika 6. Jaki pljuskovi Osijeka zabilježeni na pet lokacija raspoređenih površinom grada

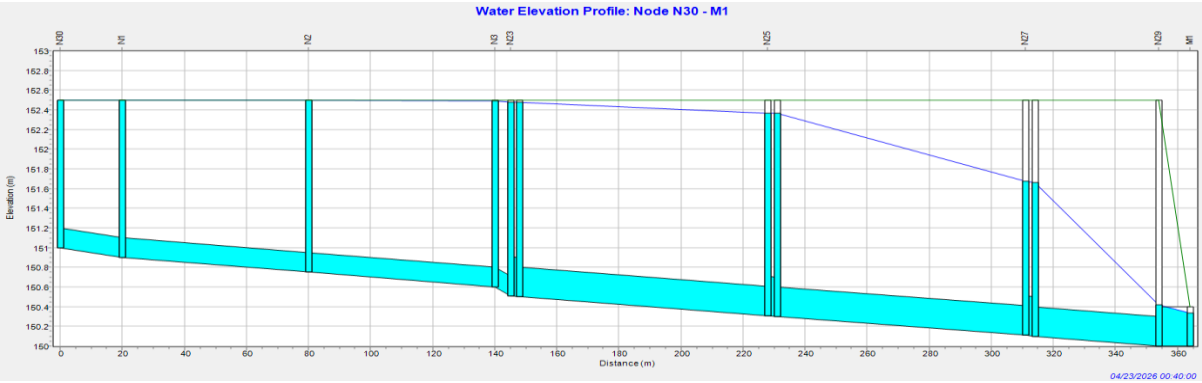
4. Imaginarni primjer urbanizacije i oslabljenja efekta odvodnje

U svim urbanim sredinama za koje su ovdje rađene analize prigradske zone su intenzivno urbanizirane. Ulični dijelovi su gubili zelene površine, otvoreni kanali su nestajali, ceste su proširivane, a dograđivane su pješačke i biciklističke staze, a pristupni putevi su proširivani dogradnjom parkirališnog prostora. Na parcelama sa jednom kućom i velikim dvorištem nicale su tzv. urbane vile, koje su zahtijevale sve više parkirnih površina. Tako je od nekih 25% nepropusnih površina nova urbana sredina stvorila čak 80% nepropusnosti. Kada se ta promjena unese u model kanalizacijske mreže odvodnje, može se uočiti što to znači za prethodno uspostavljen, primjeren i učinkovit sustav. Ovdje je u tom cilju oformljeno imaginarno naselje s primjerenim sustavom odvodnje podzemnim kanalizacijskim cijevima (slika 7.). Naselje je prvobitno činilo nešto preko 30 parcela s obiteljskim kućama za koje je

izveden kanalizacijski sustav. Ubrzanim, nedovoljno stručnim razvojem, u naselju je izgrađeno više od 3 puta više stambenih jedinica, a promet je povećan s 5-6 puta većim brojem automobila. Sve je dovelo do 3 puta povećanog udjela nepropusnih površina, što povećava pritisak na odvodni sustav. Kada se simulira otjecanje (modelom SWMM) pljuskom (60 mm/sat), kakvi su prethodno predstavljeni, početno stanje naselja nema problema pri odvodnji, a kod novog stanja (slika 8.) dolazi do prelijevanja po gradskoj površini jer je sustav zagušen.



Slika 7. Imaginarno naselje s kanalizacijom (32 kuće) i način urbanizacije (100 apartmana)



Slika 8. Preopterećenost kanalizacije zbog povećanja nepropusnosti gradskih površina

5. Zaključak

U radu predstavljena analiza dnevnih oborina za gradove slavonske Podravine, prema postojećim i dostupnim izvorima, potvrđuje opće trendove klimatskih promjena. Dakle, u ovoj regiji malo se povećala godišnja prosječna količina oborina, ali se značajno povećava poplavna opasnost kroz broj značajnijih oborina i njihove maksimalne pojave. U drugom dijelu rada iznijeti su neki primjeri znatnih i intenzivnih kiša kojima se ukazuje na sam karakter njihove pojavnosti (raspodjelu količina tijekom njihove manifestacije). To je dalo bazu za analizu funkcionalnosti odvodnog kanalizacijskog sustava u posljednjem dijelu rada. Analiza je provedena na izmišljenom naselju za dva stanja, prvobitnom i naknadnom, nakon razvojnih promjena (više stanovnika, automobila te trostruko više nepropusnijih površina) uz pretpostavku da se nije mijenjala mreža kanalizacijskih cjevovoda. Iz niza simulacijskih stanja ovdje je dat samo jedan primjer kako dolazi do preopterećenosti sustav i površinskog razlijevanja s posljedicama, tj. do urbane poplave.

6. Literatura

[1] Khasnis, Atul A.; & Nettleman, Mary D.: Global warming and infectious disease. Archives of medical research, 36(6), (2005); 689-696. https://doi:10.1016/j.arcmed.2005.03.041

[2] Klima i klimatske promjene. Državni hidrometeorološki zavod. Pristupljeno 15. lipnja 2026, https://meteo.hr/klima.php?section=klima_modeli&param=klima_promjene

[3] Zuskin, Eugenija; Mustajbegović, Jadranka; Doko Jelinić, Jagoda; Pucarin-Cvetković, Jasna; Milošević, Milan. Effects of volcanic eruptions on environment and health. Archives of Industrial Hygiene and Toxicology, 58(4), (2007); 479-486; https://doi.org/10.2478/v10004-007-0041-3

[4] Gray, L. J.; Beer, J.; Geller, M.; Haigh, J. D.; Lockwood, M.; Matthes, K.; … White, W.: Solar influences on climate. Reviews of Geophysics, 48(4); (2010); https://doi.org/10.1029/2009RG000282

[5] Van Geel, Bas; Raspopov, Oleg M.; Renssen, Hans; Van der Plicht, Johannes; Dergachev, Valentin A.; Meijer, Harro A. J.: The role of solar forcing upon climate change. Quaternary Science Reviews, 18(3), (1999); 331-338. https://doi.org/10.1016/S0277-3791(98)00088-2

[6] Trenberth, Kevin E.: Changes in precipitation with climate change. Climate research, 47(1-2), (2011); 123-138; https://doi.org/10.3354/cr00953

[7] Hatvani-Kovacs, Gertrud; Belusko, Martin, Pockett, John; Boland, John W.: Assessment of heatwave impacts. Procedia Engineering, 169, (2016); 316-323; https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.039

[8] Lee, Hoesung; Calvin, Katherine; Dasgupta, Dipak; Krinner, Gerhard.; Mukherji, Aditi; Thorne, Peter; ... & Park, Youngin. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Geneva, Switzerland; (2023); https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

[9] Schwarzenbach, Rene P.; Egli, Thomas; Hofstetter, Thomas B.; Von Gunten, Urs; & Wehrli, Bernhard. Global water pollution and human health. Annual review of environment and resources, 35(1), (2010); 109-136; https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125342

[10] Slovic, Paul: Risk perception. Carcinogen risk assessment; (1988); 171-181; https://doi.org/10.1007/978-1-4684-5484-0_13

[11] Bonacci, Ognjen: Mjere prirodnog retenciranja vode; Hrvatske vode, Vol. 24 No. 96, (2016); str. 161-169;

[12] Hadžić, Emina; Šuvalija, Suvada; Milišić, Hata; Bijedić, Dženana. Urbane poplave i mjere za njihovo ublažavanje // Urban floods and mitigation measures, 2. Konferencije o urbanom planiranju i regionalnom razvoju (online), Sarajevo, 2020.; http://uki.ba/2021/01/24/zbornik/

[13] Potočki, Kristina; Vouk, Dražen; Kuspilić, Neven. Smanjenje rizika od poplava u urbanim sredinama pomoću integralnih zelenih rješenja // Zbornik radova VII. Konferencija Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa. Zagreb: Državna uprava za zaštitu i spašavanje, (2018.) str. 70-75;

[14] Maričić, Siniša, Mijušković-Svetinović, Tatjana. The rainfall characteristics of the Osijek area // XXIth Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and the Hydrological Basis of Water Management, Bucharest, Romania, 2.- 6. September 2002.

Usporedba otpornosti na trošenje prevlaka na bazi W karbida i Cr karbida nanesenih HVOF postupkom toplinskog naštrcavanja

Comparison of wear resistance of W carbide and Cr carbide-based coatings applied by HVOF thermal spraying process

I. Vidaković[1,*], K. Šimunović[2], G. Pačarek[1], G. Rozing[3]

[1]Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska
[2]Strojarski Fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska
[1]Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespondenciju. E-mail: ividakovic@fazos.hr

Sažetak

U radu su predstavljeni rezultati istraživanja trošenja u masi abraziva tvrdih prevlaka na bazi volfram karbida (WC–CoCr) i krom karbida (CrC–NiCr), nanesenih postupkom plinskog naštrcavanja velikim brzinama čestica (HVOF). Kao osnovni materijal korišten je toplinski poboljšani krom-molibden čelik oznake 42CrMo4+QT. Ispitivanje otpornosti na trošenje provedeno je u uvjetima gibanja uzoraka kroz masu čestica abraziva pri konstantnoj brzini od 1,70 m/s, uz variranje kuta sudara čestica abraziva i trošene površine (45° i 90°). Kao abrazivno sredstvo upotrijebljen je kvarcni pijesak granulacije 0,5–1,5 mm. Analiza mehanizama trošenja dopunjena je metalografskim ispitivanjima, uključujući karakterizaciju mikrostrukture prevlaka te sučelja prevlaka/podloga primjenom svjetlosnog optičkog mikroskopa i elektronskog pretražnog mikroskopa. Primarni cilj istraživanja bio je evaluirati i usporediti otpornost na trošenje navedenih prevlaka u odnosu na neobloženi osnovni materijal, uzimajući u obzir utjecaj kuta sudara čestica abraziva i trošene površine. Dodatno, razmatrana je mogućnost primjene ovih prevlaka kao zaštitnih slojeva za povećanje trajnosti komponenata izrađenih od predmetnog čelika. Dobiveni rezultati ukazuju na značajno poboljšanje otpornosti na trošenje kod oba tipa prevlaka u usporedbi s neobloženim materijalom, neovisno o kutu sudara. Pri tome je prevlaka WC–CoCr pokazala superiorna tribološka svojstva u odnosu na prevlaku CrC–NiCr, što upućuje na njezinu veću učinkovitost u uvjetima intenzivnog abrazijskog trošenja.

Ključne riječi: WC-CoCr, CrC-NiCr, plinsko naštrcavanje velikim brzinama čestica, abrazijsko trošenje

Abstract
This paper presents the results of a study on the wear resistance in the bulk of abrasive hard coatings based on tungsten carbide (WC–CoCr) and chromium carbide (CrC–NiCr), applied by high-velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spraying. Heat-treated chromium-molybdenum steel designated as 42CrMo4+QT was used as the base material. The wear resistance test was conducted by moving samples through a mass of abrasive particles at a constant speed of 1.70 m/s, varying the angle of impact between the abrasive particles and the worn surface (45° and 90°). Quartz sand with a grain size of 0.5–1.5 mm served as the abrasive. The analysis of wear mechanisms was supplemented by metallographic tests, including characterization of the coatings' microstructure and the coating/substrate interface using light optical microscopy and scanning electron microscopy. The primary objective was to evaluate and compare the wear resistance of these coatings with that of the uncoated base material, considering the impact angle of the abrasive particles and the worn surface. Additionally, the potential use of these coatings as protective layers to increase the durability of components made from this steel was considered. The results indicate a significant improvement in the wear resistance of both types of coatings compared to the uncoated material, regardless of impact angle. The WC–CoCr coating exhibited superior tribological properties compared to the CrC–NiCr coating, indicating greater effectiveness under intense abrasive wear conditions.

Key words: WC-CoCr, CrC-NiCr, High velocity Oxygen Fuel Flame, abrasive wear

1. Introduction

Wear is one of the most common causes of machine failure. It can make normal operation difficult or impossible, and in some cases even lead to complete machine shutdown. Wear is defined as damage to a solid surface in which material is gradually removed, caused by relative motion between contacting surfaces [1]. A specific form of wear occurs when a tool moves through a mass of abrasive material [2]. Under such conditions, machine parts and tools that contact the abrasive are exposed to severe metal wear, leading to rapid changes in their geometric dimensions and shapes [3]. The authors [4] state that such wear is experienced by machines used for extracting and transporting minerals, as well as parts of agricultural and construction machinery [5,6].

According to the authors [7], understanding and describing the wear process in an abrasive mass requires a systematic and comprehensive approach to analyzing the friction process. This approach includes consideration of the parameters of the soil working process and the characteristics of the machine's working part. In this context, special attention is given to the influence of the soil mass, as factors related to the soil largely determine the mechanism and nature of wear. Conversely, the properties of the material from which the working element is made primarily affect the intensity or rate of the wear process. Given this, various procedures are used for wear protection, aiming to change the material structure or type of material on the tool's working surface. One method to change the type of material on the tool's working surface is the high-velocity gas spraying (HVOF) process, which was used in this research. A wide range of materials is used as additional components in the production

of coatings, with chromium carbide alloys featuring a nickel and chromium matrix being frequently employed [8-10], as well as tungsten carbide with various matrix materials [11-13], both of which are applied in this research (CrC-NiCr and WC-CoCr). These coatings exhibit high wear resistance, good mechanical properties, and excellent resistance to corrosion and oxidation.

A review of the available literature did not reveal any scientific papers addressing the wear of coatings based on WC and CrC in abrasive mass, which further highlights the need for systematic research on these coatings. The aim of this paper is to conduct a comparative analysis of the wear resistance of coatings based on CrC and WC under abrasive mass wear conditions, while considering the influence of the impact angle of abrasive particles on the worn surface. Based on the results obtained, an attempt is made to assess the justification for applying these coatings as protective layers on parts exposed to this wear mechanism.

2. Material and methods

A comparative assessment of wear resistance was conducted by testing samples of alloys based on chromium carbide (CrC-NiCr), alloys based on tungsten carbide (WC-CoCr), and the base material (without coating), using a device for testing wear in the mass of abrasives. Wear resistance was measured by determining the mass loss of the samples after the total length of the wear path.

2.1. Coating material

As a coating material, an alloy based on chromium carbide, CrC-NiCr (CastoJet® HVOF - powder, 55580C), which is composed of 80% hard particles of chromium carbide (Cr3C2) and 20% Ni-Cr matrix and an alloy based on tungsten carbide (CastoJet® HVOF - powder, 55586C), which is composed of 86% tungsten carbide, 10% cobalt and 4% chromium. The declared chemical composition of the alloys used for the production of coatings is shown in table 1.

Table 1 Chemical composition of powders [14]

Type of coating	Chemical element, % mass								
CrC-NiCr	C	Cr	Ni	Fe	Rest				
	10,20	Base	16	0,25	0,26				
	Chemical element, % mass								
WC-CoCr	C	Free C	W	Co	Cr	Ta	Ni	Ti	Rest
	5,2	0,1	Base	10	4	0,05	0,05	0,05	0,1

The high velocity oxygen fuel (HVOF) process was used to apply the coatings, as schematically shown in Figure 1. Figure 2 shows the ABB IRB 2400 robot used during the coating application.

The HVOF process uses the combustion of fuel and oxygen to generate the heat required to melt the powder. Combustion occurs in a high-pressure chamber.

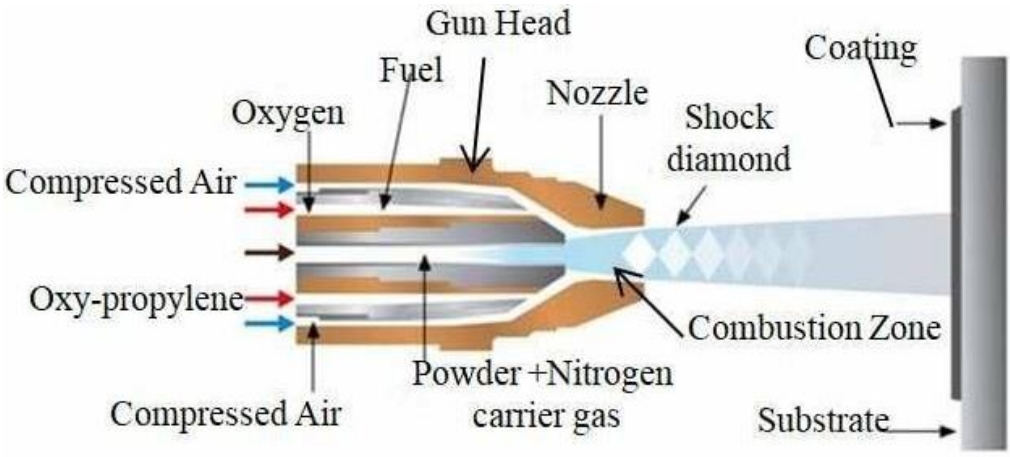


Figure 1. Schematic representation of the High velocity oxygen fuel (HVOF) process [15]

Due to the high pressure and flow rate, the gases reach a speed of 2100 m/s, while the molten particles can reach speeds up to 800 m/s. The fuels used in this process include propane, propylene, hydrogen, acetylene, natural gas, and kerosene.

Figure 2. Robotic arm ABB IRB 2400 [14]

Coatings applied by the HVOF process, compared to other thermal spraying processes, are characterized by high adhesion strength, low porosity, low oxide content, and minimal reduction in the concentration of alloying elements due to the combustion process [16]. These coatings also exhibit high resistance to wear, corrosion, and oxidation, and are used in many industrial sectors [17].

2.2 Substrate material

Chromium-molybdenum steel 42CrMo4+QT (hardness 37 HRC), previously heat-treated, was used as the substrate for the tested alloys. The sample dimensions were 40 × 25 × 15 mm, determined by the size of the sample holder on the wear test device. The microstructure of the substrate material was determined using light optical microscopy, and Figure 3 shows a martensitic microstructure with a characteristic needle-like shape.

The steel used is classified as a low-alloy, high-strength steel, characterized by good fatigue resistance, high impact strength, and favorable weldability. Due to these properties, this

steel is often used to manufacture working parts of agricultural, construction, and other machinery that are subject to intense abrasive wear during operation.

2.3 Wear test

The wear test was conducted using a device [14] designed to test wear in bulk abrasives at predefined kinematic parameters. During the test, samples placed on a three-armed support move in a circular path inside a container filled with abrasive. This setup simulates operating conditions comparable to those encountered during actual material use. The device for testing wear in bulk abrasives is shown in Figure 4.

Figure 3. Microstructure of the substrate material (42CrMo4+QT), etched in 3% nital [14]

Figure 4. Abrasive mass wear device [14]

The resistance to abrasion wear of CrC–NiCr and WC–CoCr coatings was determined using abrasive mass at a constant sample movement speed of 1.70 m/s. To examine the effect of the impact angle of abrasive particles with the worn surface on coating resistance, experiments were conducted at impact angles of 45° and 90°. Based on available literature data [18] and the assumed abrasiveness of the quartz sand used, the experiment was conducted with a total wear path of 20 000 m.

2.4 Abrasive used in the experiment

The working elements of agricultural machinery experience continuous wear during operation due to contact with soil particles. Since quartz is a key factor in soil abrasion, quartz sand with the commercial name “Kema FB150S" was used for testing in this study. The sand had previously undergone washing to remove impurities and was dried at high temperatures. The particle size of the material ranged from 0.5 to 1.5 mm.

2.5 Measurement of mass loss of samples

Wear resistance was assessed by monitoring the mass loss of the samples after the test (total wear distance covered). This parameter was calculated as the difference in the mass of the sample before and after exposure to the abrasive medium. Measurements were performed in the Central Laboratory of the Department of Agroecology and Environmental Protection at the Faculty of Agrobiotechnical Sciences in Osijek, using a Kern & Sohn GmbH

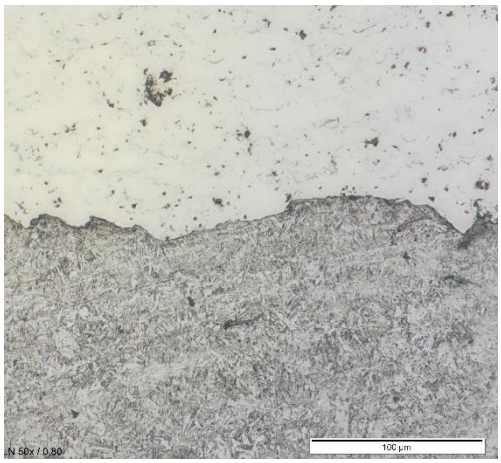
ALJ 160-4A analytical balance. The device has a precision of 0.1 mg (10^{-4} g) and a working range up to 160 g.

3. Metallographic analysis of samples

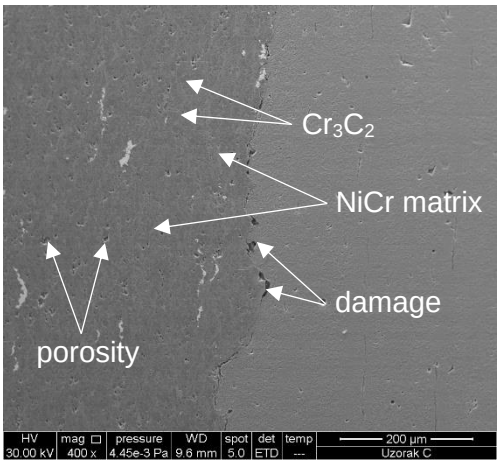
To examine the microstructure of the coating and the contact surface with the substrate, as well as the influence of the spraying process on the base material, a metallographic analysis was performed. The analysis included imaging the samples with a light optical microscope and observation with a scanning electron microscope (SEM). These tests were performed in the laboratory of the Istrian County Materials Research Center Metris.

The preparation of samples for metallographic analysis involved several consecutive phases. First, the samples were cut, then cast in a three-component acrylic resin. This was followed by grinding and polishing, and then etching in a 2% nital solution. Finally, the samples were rinsed and dried.

Figure 6 a) shows the microstructure of the cross-section of the sample with a CrC-NiCr coating, recorded with a light optical microscope. The figure shows that the coating is compact, without visible damage or cracks, with a clearly defined boundary between the coating material and the substrate, and a small amount of porosity. Figure 6 a) also shows that the substrate material retained its martensitic structure after the spraying process, indicating that the thermal energy input during spraying at high particle speeds had no significant effect on the substrate. Figure 6 b) shows a micrograph of the interface of the CrC-NiCr coating. The image reveals that the coating consists essentially of a two-phase structure, with darker particles representing chromium carbide and a lighter phase representing the NiCr matrix. At the CrC-NiCr coating/substrate interface, irregularities in the coating structure are visible, representing damage caused during preparation of the sample surface for the spraying process. Microstructural analysis performed after the wear process revealed no structural changes in the tested samples.



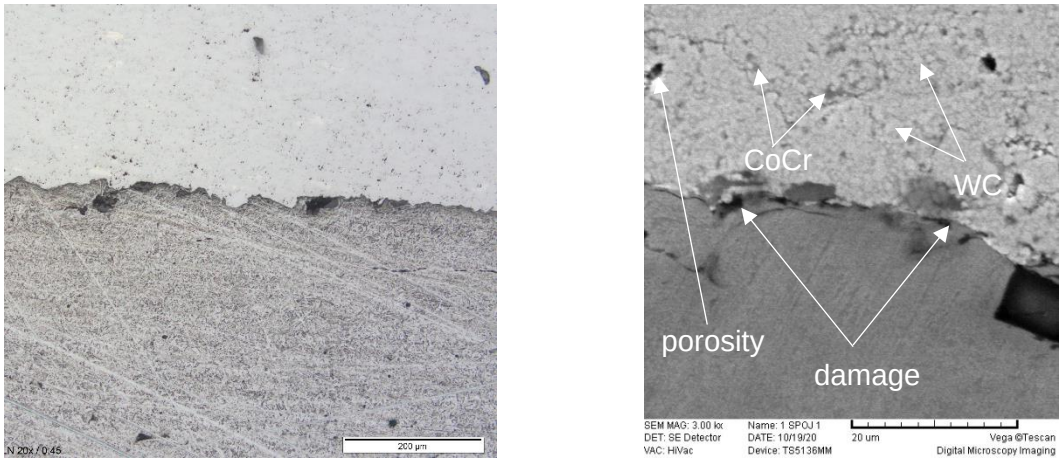
a) CrC-NiCr coating/substrate interface imaged with light microscope



b) SEM micrograph of the CrC-NiCr coating/substrate interface

Figure 6 Metallographic analysis of CrC-NiCr coating

Figures 7 a) and 7 b) show the microstructural analysis of the cross-section of the WC-CoCr coating.



a) WC-CoCr coating/substrate interface imaged with light microscope

b) SEM micrograph of the WC-CoCr coating/substrate interface

Figure 7 Metallographic analysis of WC-CoCr coating

Figure 7 a) shows that the coating is compact, without damage or cracks, and has a clearly defined boundary between the coating and the substrate. The martensitic microstructure of the substrate is also visible, indicating that the high heat input during the spraying process did not significantly affect the substrate material. Figure 7 b) shows that the coating is primarily composed of two phases (lighter and darker areas). The lighter areas correspond to tungsten carbide particles, while the darker areas represent the cobalt-chromium matrix. Irregularities are visible at the coating/substrate interface, which indicate damage to the substrate caused during its preparation (sandblasting with alumina particles) for the spraying process. Microstructural analysis performed after the wear process revealed no structural changes in the tested samples.

4. Results and discussion

The wear experiment using abrasive mass was conducted for each tested coating (CrC–NiCr and WC–CoCr), as well as for the reference substrate without a coating, at a constant sample movement speed of 1.70 m/s. Tests were performed at two angles of impact between the abrasive particles and the worn surface (45° and 90°), with two consecutive measurements taken for each angle.

The second measurement was not an independent repetition of the experiment but a continuation under the same experimental conditions. Specifically, after a total wear distance of 20 000 m, the mass loss was measured, and the test was then continued on the same samples without changing the parameters. Accordingly, wear was analyzed based on the average mass loss from both measurements. The results are shown in Table 2.

Analysis of the results in Table 2 indicates that most samples exhibit more intense mass loss during the first measurement. This trend is characteristic of the initial phase of the tribological process, known as the contact adjustment or running-in phase, during which intensive abrasion of micro-asperities and adaptation of the surface topography occur. After

reaching a steady state of wear, the tribological system stabilizes, resulting in decreased wear intensity and lower mass loss of the samples.

Table 2. Average mass loss of tested samples

Sample	Impact angle, [°]	Mass, [g]		
		Mass loss after 1st repetition	Mass loss after 2nd repetition	Average mass loss
CrC-NiCr	45	0,0083	0,0068	0,0076
CrC-NiCr	90	0,0043	0,0033	0,0038
WC-CoCr	45	0,0058	0,0044	0,0051
WC-CoCr	90	0,0055	0,0008	0,0032
Substrate	45	0,0512	0,0480	0,0496
Substrate	90	0,0338	0,0294	0,0316

The wear results presented in Table 2 and Figure 8 indicate that the WC-CoCr coating has a lower mass loss than the CrC-NiCr coating at both impact angles (45° and 90°). The CrC-NiCr coating has lower hardness (63 HRC) and weaker bonding between the nickel-chromium matrix and chromium carbide particles compared to the WC-CoCr coating, which has higher hardness (70 HRC) and strong bonding between the cobalt-chromium matrix and tungsten carbide particles. For this reason, the CrC-NiCr coating experienced higher mass loss. At an impact angle of 45°, the WC-CoCr coating exhibited 32.89%, or 1.49 times (0.0076/0.0051), lower average mass loss than the CrC-NiCr coating, while at an impact angle of 90°, the WC-CoCr coating exhibited 15.79%, or 1.19 times (0.0038/0.0032) lower mass loss than the CrC-NiCr coating.

Analyzing the effect of the abrasive particle impact angle on the worn surface (based on the results in Table 2), it is evident that all tested coatings, as well as the substrate material, exhibited higher mass loss at the lower impact angle of 45°. This result can be attributed to the longer contact duration between the abrasive particles and the worn surface at smaller impact angles. During an individual interaction, at a smaller impact angle, the abrasive particle remains in contact with the worn surface after impact and continues to slide along it. In contrast, at larger impact angles, the particle bounces off the surface after impact, which shortens the contact time and reduces wear.

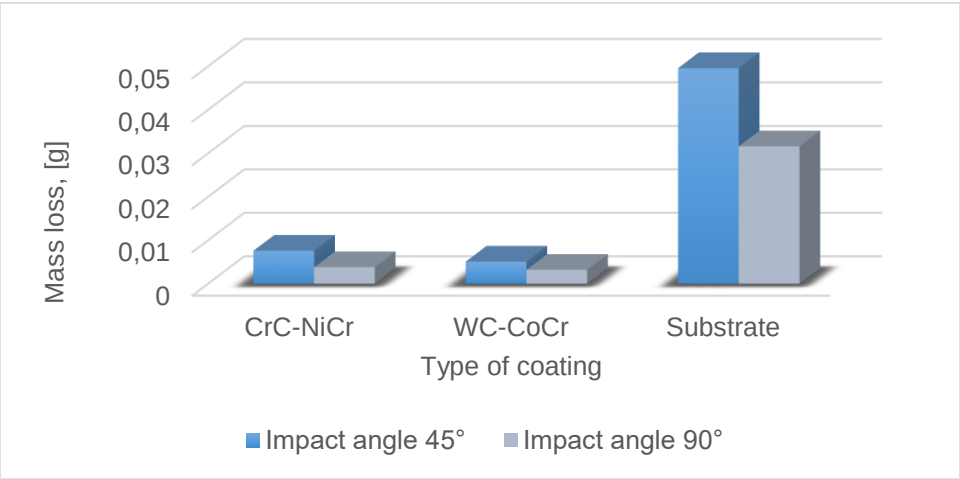


Figure 8. Schematic representation of the mass loss of the coatings and substrates investigated

Compared with the base material without a coating, both tested coatings showed lower mass loss at both tested impact angles of the abrasive particles and the worn surface (45° and 90°). In both cases, the WC-CoCr coating performed better. At an impact angle of 45°, the WC-CoCr coating had 89.72%, or 9.72 times (0.0496/0.0051), lower mass loss than the base material without a coating. In contrast, the CrC-NiCr coating achieved 84.68%, or 6.53 times (0.0496/0.0076), lower mass loss than the base material. At an impact angle of 90°, the WC-CoCr coating again achieved a better result, with 89.8%, or 9.88 times (0.0316/0.0032), lower mass loss compared with the base material without a coating. Under the same conditions, the CrC-NiCr coating had 87.97%, or 8.32 times (0.0316/0.0038), lower mass loss than the base material without a coating. These results are a consequence of the significantly higher hardness of the tested coatings compared to the uncoated base material.

5. Conclusion

By comparing the results of research on coatings applied by the gas spraying process with high particle velocities, it was determined that the average mass loss of the WC-CoCr coating was lower than that of the CrC-NiCr coating at both impact angles (45° and 90°). This result is due to the higher hardness and strong bond between the cobalt-chromium matrix and the tungsten carbide particles.

It was found that all tested coatings and the uncoated substrate exhibited higher mass loss at the lower angle of impact of the abrasive particles and the worn surface. This result is a direct consequence of the kinematics of the impact. In a single impact event, abrasive particles at a lower angle of impact achieve extended contact by sliding on the substrate, while at a higher angle of impact the kinetic energy is primarily expended on deformation due to the impact and immediate repulsion.

Experimental results showed significantly higher resistance to wear by abrasive particles in the studied coatings compared to the uncoated substrate at both impact angles. This result directly correlates with the higher surface hardness of the coatings (63 HRC for CrC-NiCr and 70 HRC for WC-CoCr) compared to the substrate (37 HRC). This confirms the technical justification for applying the selected coatings for wear protection, repair of damaged parts, and prolonging the service life of machine components exposed to abrasive wear.

Acknowledgement

This research was supported by the scientific project “Prediction of maize yield potential using machine learning models based on vegetation indices and phenological metrics from Sentinel-2 multispectral satellite images (AgroVeFe)—581-UNIOS-30”, which was funded by the European union—NextGenerationEU.

6. References

[1] Yazici, Aysel: Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions // *Soil and Tillage Research*, 242(2024), 106161.

[2] Ivušić, Vinko. Tribologija. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 1998. (ISBN 953-96038-3-8)

[3] Dvoruk, Volodymyr Ivanovych: Influence of the shape of abrasive soil particle on the regularities of destruction of structural steels during wear // *Problems of Tribology*, 29(2024), 4/114-2024; 6-13.

[4] Lemacha, Magdalena; Ligier, Krzysztof; Napiórkowski, Jerzy; Vrublevskyi, Oleksander: Analysis of Tribological Properties of Hardfaced High-Chromium // *Materials*, 17(2024), 34161.

[5] Lemacha, Magdalena; Napiórkowski, Jerzy; Ligier, Krzysztof; Tarasiuk, Wojciech; Sztukowski, Krzysztof: Analysis of Wear Properties of Powder Metallurgy Steel in Abrasive Soil Mass // *Materials*, 15(2022), 6888.

[6] Vidaković, Ivan; Heffer, Goran; Grilec, Krešimir; Samardžić, Ivan: Resistance of modified material surfaces for agricultural tillage tools to wear by soil particles // *Metallurgy*, 61(2022), 2; 355-358.

[7] Napiórkowski, Jerzy; Lemacha, Magdalena; Konat, Łukasz: Forecasting the Wear of Operating Parts in an Abrasive Soil Mass Using the Holm-Archard Model // *Materials*, 12(2019), 2180.

[8] Yang, jun; Sun, Yijiao; Su, Minwen; Yin, Xueming; Li, Hongxiang; Zhang, Jishan: Corrosion and Erosion Wear Behaviors of HVOF-Sprayed Fe-Based Amorphous Coatings on Dissolvable Mg-RE Alloy Substrates // *Materials*, 16(2023), 5170.

[9] Daniel, Josef; Grossman, Jan; Houdková, Šárka, Bystrianský, Martin: Impact Wear of the Protective Cr3C2-Based HVOF-Sprayed Coatings // *Materials*, 13(2020), 2132.

[10] Schubert, Jan; Česánek, Zdeněk., Bláhová, Olga: Mechanical Properties of HVOF Sprayed CrC-NiCr Coating Exposed to Hot Corrosion Environment // Key Engineering Materials, 784(2018); 141-146.

[11] Song, Bo; Murray, James W.; Wellman, Richard G.; Pala, Zdenek, Hussain, Tanvir: *Dry sliding wear behaviour of HVOF thermal sprayed WC-Co-Cr and WC-CrxCy-Ni coatings* // *Wear*, 15(2019), 442-443, 203114.

[12] Owoseni, Tunji Adetayo; Gupta, Mohit; Joshi, Shrikant V.; Mare, Ingmar; Varis, Tommi: Wear and Corrosion of HVAF and HVOF-Sprayed WC-CoCr Coatings on Aluminum Alloy // *Journal of Thermal Spray Technology*, 34(2025); 970-991.

[13] Özbek, Yildiz Yarali, Ipek, Ahmet: Hihg-performance WC-Co coatings via HVOF: Mechanical properties of steel surfaces // *Reviews on Advanced Materials Science*, 64(2025), 20250168.

[14] Vidaković, Ivan. Statističko modeliranje i optimiranje trošenja tvrdih toplinski naštrcanih prevlaka u masi abraziva // Doktorska disertacija, Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2021.

[15] Kumar, Rakesh; Kumar, Rajesh; Kumar, Santosh: Erosion Corrosion Study of HVOF Sprayed Thermal Sprayed Coatings on Boiler Tubes: A Review // *International Journal of Science and Management Studies*, 01(2018), 03, E-ISSN: 2581-5946.

[16] Filetin, Tomislav; Grilec, Krešimir. Postupci modificiranja i prevlačenja površina // Priručnik za primjenu. Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2004, 257 str.

[17] Fauchais, Pierre Léon, Heberlein, Joachim Viktor Rudolf, Boulos, Maher Ibrahim. Thermal Spray Fundamentals, From powder to Parts. New York, Heidelberg, Dordrecht, London, 2014, 1566 str.

[18] Vidaković, Ivan; Heffer, Goran; Špada, Vedrana; Samardžić, Iva: Comparison of wear resistance of induction-hardened and gas-nitrided samples in the abrasive mass motion // *Metallurgy*, 62(2023), 2; 285-288.

Primjena 3D skeniranja i reverzibilnog inženjeringa u rekonstrukciji poklopca mikroračunala
Application of 3D Scanning and Reverse Engineering in the Reconstruction of a Microcomputer Cover

S. Švoger[1,*], Z. Busija[1], Z. Botak[1], D. Lukman[1]

[1]Sveučilište Sjever, 104. Brigade 3, 42000 Varaždin

[*]Autor za korenspodenciju. E-mail: sinisa.svoger@unin.hr

Sažetak
U ovom radu prikazan je postupak rekonstrukcije poklopca mikroračunala Galeb primjenom tehnologije 3D skeniranja (*3D scan*) i reverzibilnog inženjeringa (*Reverse Engineering*). Poligonalni model (*Mesh*) dobiven je pomoću 3D skenera Artec Eva a dobiveni podaci obrađeni su u programskom paketu Artec Studio. Izrada parametarskog 3D modela odrađena je u Geomagic Design X programu koji služi za reverzibilni inženjering. Cilj rada bio je izraditi točan digitalni model postojećeg poklopca mikroračunala radi njegove analize, rekonstrukcije i mogućnosti daljnje proizvodnje. Tijekom procesa analizirani su ključni koraci obrade podataka, uključujući poravnanje skenova, uklanjanje nepravilnosti i optimizacije modela. Rezultati rada pokazuju da kombinacija 3D skeniranja i reverzibilnog inženjeringa predstavlja učinkovitu metodu za digitalnu rekonstrukciju tehničkih komponenti.

Ključne riječi: 3D sken, Poligonalni model, Reverzibilni inženjering, Mikroračunalo Galeb, Geomagic Design X

Abstract
This paper presents the reconstruction process of the Galeb microcomputer enclosure using 3D scanning and reverse engineering technologies. A polygon mesh was acquired using an Artec Eva optical 3D scanner and processed in Artec Studio software. The 3D model was then generated from the point cloud in Geomagic Design X, a reverse engineering tool. The aim of the study was to create an accurate digital model of the existing cover for analysis, reconstruction, and potential further manufacturing. Key processing steps included scan alignment, noise removal, and model optimization. The results demonstrate that the combination of 3D scanning and reverse engineering is an efficient approach for digitally reconstructing complex technical components and significantly reduces product development time.

Key words: 3D scan, Polygon Mesh, Reverse Engineering, Microcomputer Galeb, Geomagic Design X

1. Uvod

Izravno inženjerstvo (*Forward Engineering*) polazi od logičkih, matematičkih i apstraktnih ideja te ih pretvara u fizičke proizvode ili sustave, reverzibilni inženjering predstavlja suprotan postupak. Kreće od fizičkog predmeta ili sustava prema digitalnom modelu koji je moguće pretvoriti u datoteku koja je čitljiva u 3D CAD programima [1].

Primjena reverzibilnog inženjeringa u kombinaciji s 3D skeniranjem sve je prisutnija u industrijskoj praksi, posebice u slučajevima rekonstrukcije zastarjelih ili oštećenih komponenti za koje originalna projektna dokumentacija nije dostupna.

Autori [2] prikazali su primjenu laserskog 3D skeniranja i reverzibilnog inženjeringa u digitalizaciji unutrašnjosti kombi vozila s ciljem planiranja njegove prenamjene u kamper vozilo. U navedenom radu korišten je laserski skener FARO Focus za dobivanje oblaka točaka, a obrada podataka provedena je u programu Geomagic Design X. Rezultati su pokazali da automatizirana metoda pretvorbe oblaka točaka u površinski model donosi određena ograničenja u pogledu preciznosti (±1–4 mm) te da generirani model ne sadržava parametarske skice i značajke koje je moguće naknadno mijenjati.

U ovom radu prikazuje se primjena iste metodologije na znatno manji i geometrijski jednostavniji objekt u obliku poklopca mikroračunala Galeb (YU101), prvog hrvatskog mikroračunala [3] čiji je prototip predstavljen 1981. godine, a kojeg je razvila varaždinska tvrtka PEL. Zbog malo proizvedenih primjeraka, Galeb (Slika 1.) danas predstavlja rijedak primjerak hrvatske računalne baštine, što digitalnoj rekonstrukciji njegovog poklopca daje poseban značaj. Za razliku od prethodnog istraživanja u kojem je korišten stacionarni laserski skener koji generira oblak točaka, ovdje se primjenjuje ručni optički skener Artec Eva koji korištenjem tehnologije strukturiranog svjetla već tijekom skeniranja direktno generira poligonalni model, što ga čini prikladnijim za skeniranje manjih predmeta s kompleksnom geometrijom. Dobiveni poligonalni model obrađuje se u programu Geomagic Design X s ciljem izrade točnog parametarskog 3D CAD modela radi analize, rekonstrukcije i mogućnosti daljnje proizvodnje.

Slika 1. Mikroračunalo Galeb (YU101), tvrtke PEL iz Varaždina

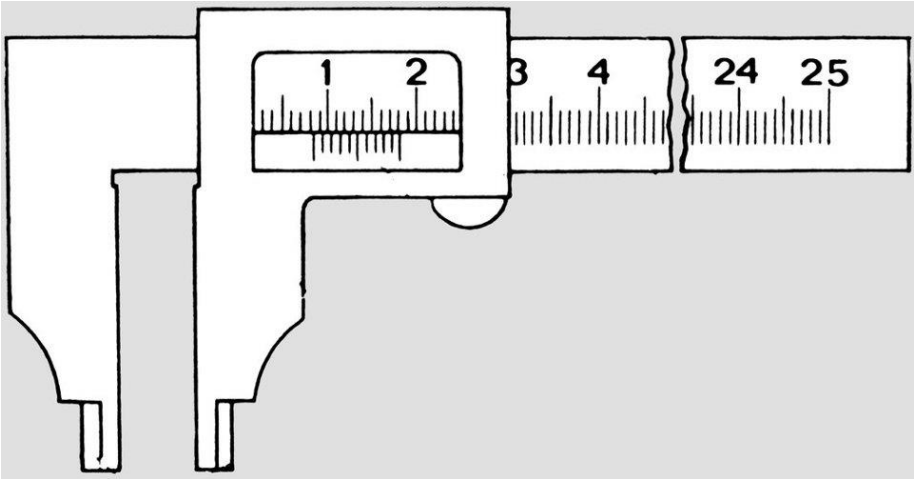
2. Reverzibilni inženjering

Engleski termin *Reverse Engineering*, koji se u literaturi pojavljuje i pod nazivom *Back Engineering* [4], u hrvatskom jeziku prevodi se na dva načina, kao reverzibilni inženjering ili kao povratno inženjerstvo. Oba pridjeva (reverzibilno i povratno) pojavljuju se u stručnoj literaturi i rječniku strojarskih izraza [5], pri čemu je jezično ispravniji oblik reverzibilno inženjerstvo, budući da se pridjev pravilno slaže s imenicom inženjerstvo. U ovom radu koristi se termin reverzibilni inženjering, koji je češći u domaćoj tehničkoj praksi, što potvrđuje i njegova primjena u većini hrvatskih tvrtki koje se bave ovom djelatnošću [6,7].

U općenitom smislu, reverzibilni inženjering može se definirati kao identificiranje postojećih tehničkih i prirodnih rješenja te njihova rekonstrukcija u nova, identična ili čak unaprijeđena tehnička rješenja, pri čemu je ova praksa prisutna od samih početaka tehnologije [8].

Važno je napomenuti da se reverzibilni inženjering ne odnosi isključivo na fizičke proizvode i mehaničke komponente, već i na softverske sustave. U tom kontekstu, reverzibilni inženjering softvera podrazumijeva analizu programskog koda i arhitekture sustava s ciljem razumijevanja njegove funkcije i načina rada, bez pristupa izvornom kodu [9].

Reverzibilni inženjering u svojoj najosnovnijoj formi prisutno je od samih početaka ljudske civilizacije. Jedan od najjednostavnijih i povijesno najstarijih instrumenata koji se može smatrati alatom reverzibilnog inženjeringa je pomično mjerilo (Slika 2).



Slika 2. Pomično mjerilo [10]

Razvojem industrije i pojavom kompleksnijih proizvoda rasla je i potreba za sofisticiranijim metodama digitalizacije oblika. Uvođenjem koordinatnih mjernih strojeva u drugoj polovici 20. stoljeća reverzibilni inženjering dobiva svoju prvu automatiziranu dimenziju, a pojavom beskontaktnih optičkih i laserskih skenera od 1990-ih godina nadalje proces postaje znatno brži, precizniji i primjenjiv na složenije geometrije.

3. 3D skeneri

Autori [11] reverzibilni inženjering usko povezuju s tehnologijom 3D skeniranja te ističu da je reverzibilni inženjering u industrijskim i potrošačkim primjenama proces koji se koristi za izradu tehničke dokumentacije na temelju postojećeg fizičkog objekta, pri čemu su 3D skeneri najčešće korišteni uređaji upravo zbog mogućnosti brzog prikupljanja podataka s praktički 100% površine dijela.

3D skeneri mogu se podijeliti prema različitim kriterijima (Slika 3.). U literaturi [11,12] ,13] najčešće se navode tri osnovne podjele: prema fizičkoj veličini i mobilnosti samog skenera, prema veličini objekta koji se skenira te prema tehnologiji skeniranja

Kriterij podjele	Vrsta skenera	Karakteristike	Primjeri
Prema fizičkoj veličini skenera	**Stolni**	Najmanji, za radnu površinu, visoka preciznost	Artec Micro, EinScan-SE
	Ručni	Kompaktni i prijenosni, fleksibilno skeniranje	Artec Eva, Artec Leo, Artec Spider II
	Stacionarni	Najveći, na tronošcu, za velike objekte i prostore	FARO Focus, Leica BLK360
Prema veličini skeniranog objekta	**Za male objekte** (do 300 mm)	Nakit, dentalne proteze, elektronika, mali strojni dijelovi	Artec Micro, Artec Spider II
	Za srednje objekte (300 – 2000 mm)	Strojni dijelovi, kućišta, prototipovi, manji sklopovi	Artec Eva, Artec Leo, ATOS Q
	Za velike objekte (iznad 2000 mm)	Vozila, brodovi, građevine, industrijska postrojenja	FARO Focus, Artec Ray
Prema tehnologiji skeniranja	**Laserski skeneri** Aktivni beskontaktni	Mjere vrijeme povratka laserske zrake ili fazni pomak, veliki domet	FARO Focus, Leica BLK360, Artec Ray
	Strukturirano svjetlo Aktivni beskontaktni	Projiciraju uzorak svjetla na objekt i snimaju ga kamerama, brza akvizicija	Artec Eva, ATOS Q, EinScan Pro
	Fotogrametrija Pasivni beskontaktni	Niz slika iz različitih kutova, softver rekonstruira 3D model	Metashape, RealityCapture, smartphone apps

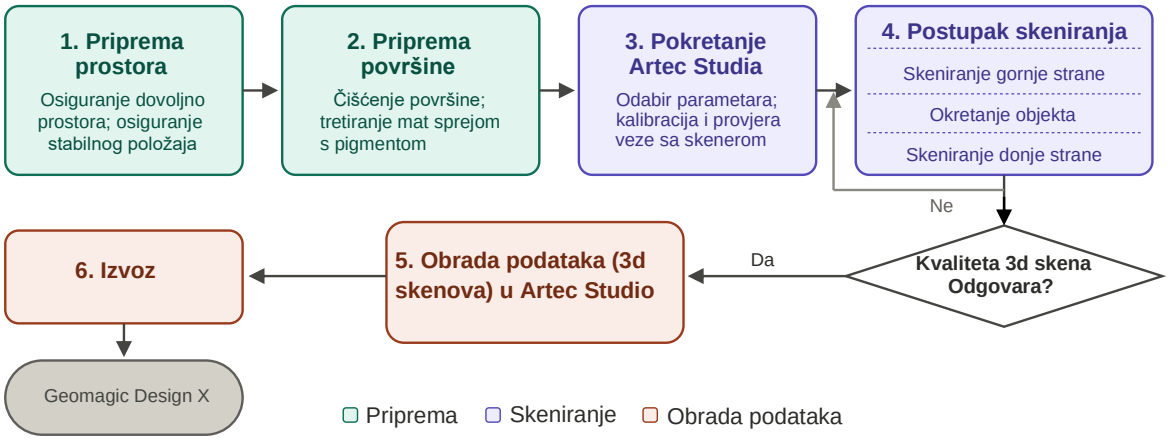
Slika 3. Podjela 3D skenera s navedenim (tržišno dostupnim) primjerima uređaja

4. Postupak 3D skeniranja i obrade podataka

Postupak 3D skeniranja proveden je pomoću skenera Artec Eva-M ver EV.30.24526195 koji, prema Slici 3., pripada kategoriji ručnih skenera namijenjenih skeniranju objekata srednje veličine. Artec Eva (Slika 4.) beskontaktni je optički skener koji radi na principu strukturiranog svjetla, s točnošću do 0,1 mm i rezolucijom točaka do 0,5 mm, što ga čini prikladnim izborom za skeniranje poklopca mikroračunala Galeb čija geometrija uključuje ravne površine, zakrivljenja i sitne detalje.

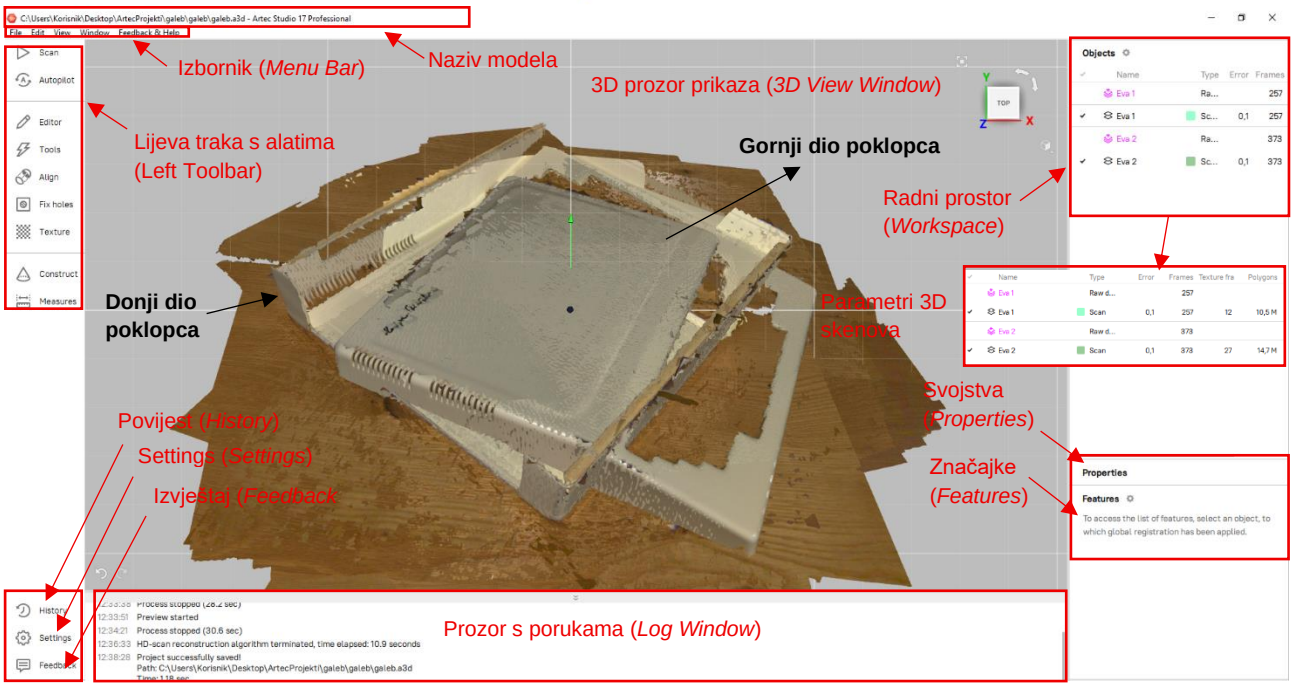
Slika 4. Artec Eva 3D ručni skener [14]

Postupak 3D skeniranja sastoji se od: pripreme, skeniranja i obrade podataka (Slika 5.). Za ovaj slučaj u postupku pripreme potrebno je imati osigurati dovoljno prostora jer Artec Eva ima definirano radno područje od 400 mm do 1000 mm, pa objekt mora biti pozicioniran unutar tog raspona, a zbog reflektirajuće površine poklopca potrebno je nanijeti mat sprej s pigmentom kako bi se omogućilo kvalitetno skeniranje.



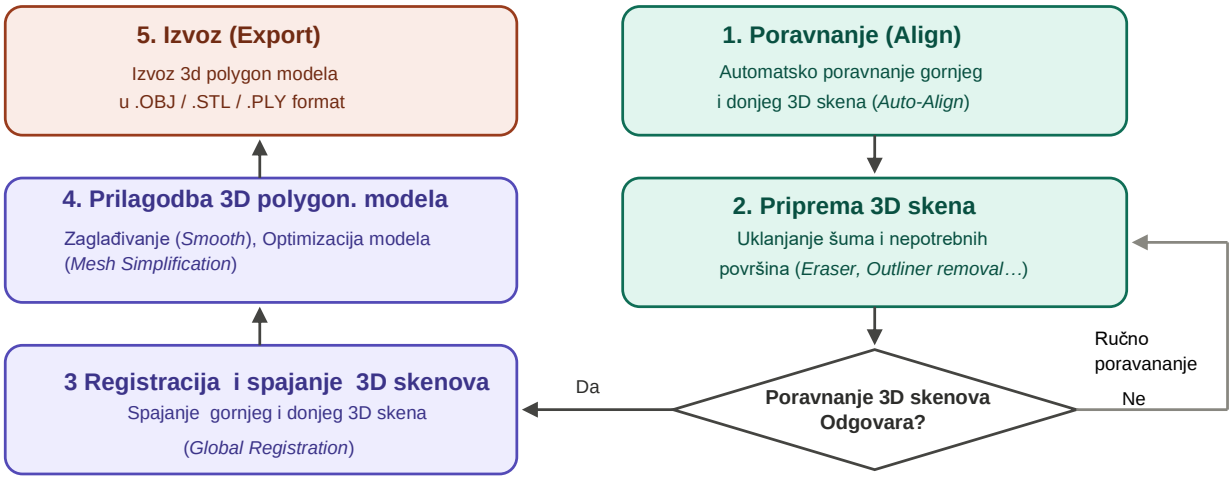
Slika 5. Proces 3D skeniranja za poklopac mikroračunala

Prema Slici 5. postupak 3D skeniranja sastoji se od pokretanje Artec Studio Professional x64 17.1.2.15 ver. programa i samog skeniranja poklopca koje je odrađeno na način da se prvo skenirao gornji dio poklopca a onda nakon okretanje objekta odrađeno je i skeniranje donje strane. Na slici 6 nalazi se grafičko sučelje sa svim glavnim dijelovima, 3D skenom i parametrima 3D skenova (*Polygons, Frames, Type, Error, Name*).



Slika 6. Glavni dijelovi Artec Eva grafičkog sučelja s 3D skenovima poklopca

Korak Obrada podataka (3D skenova) u Artec Studio prikazan na Slici 5. sastoji se od sljedećih koraka (s korištenjem raznih alata): Poravnavanje (*Align*), Priprema 3D skena (*Eraser, Outline.rem.*), Registracija i spajanje (*Global Registration*), Prilagodba modela (*Smooth, Mesh Simpification*) i Izvoz modela u potrebni format (*Export*), (Slika 7.).

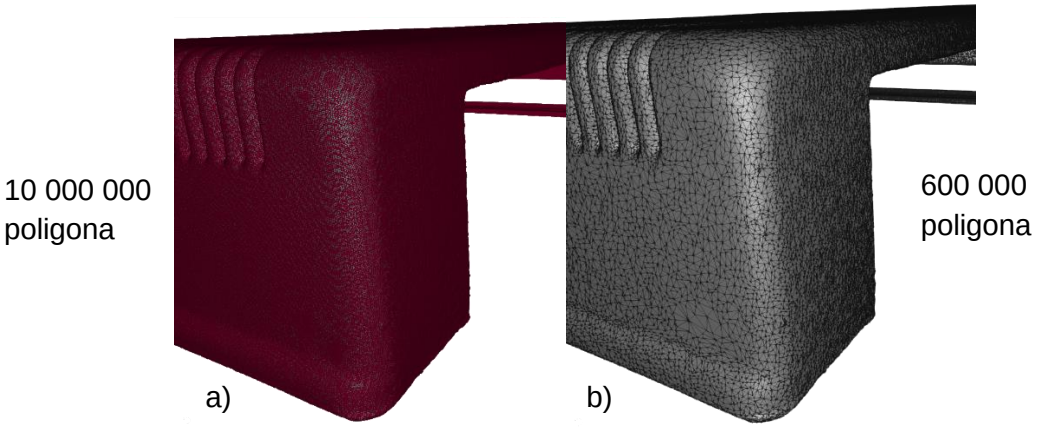


Slika 7. Potrebni koraci kod obrade podatka (3D skenova) u Artec Studio

Postupak obrade poligonalnog modela (*Mesh Simplification*) proveden je u dva koraka s ciljem smanjenja složenosti modela uz zadržavanje geometrijske točnosti. Rezultati obrade s veličinom modela prikazani su u Tablici 1 i Slici 8.

Table 1. Usporedba poligonalnih modela u pojedinim fazama obrade

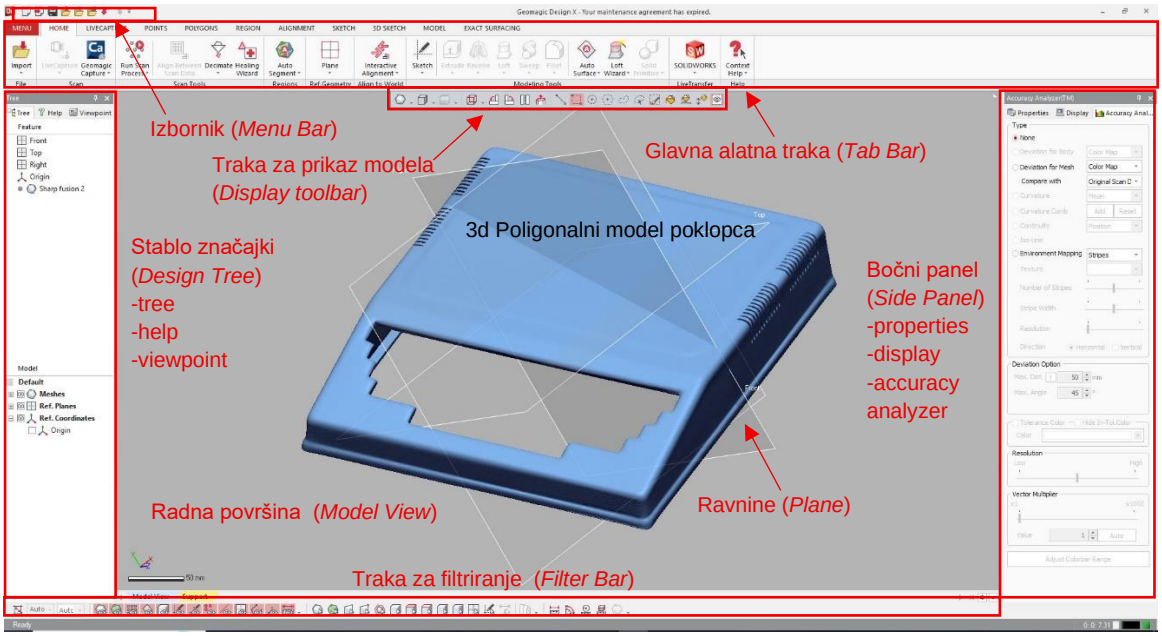
Stanje modela	Broj poligona	Veličina datoteke
Početni 3d sken	25 000 000	902 MB
Nakon globalne registracije	10 000 000	432 MB
Nakon optimizacije	600 000	23 MB



Slika 8. Usporedba poligonalnog modela prije (a) i nakon (b) optimizacije (*Mesh Simp.*)

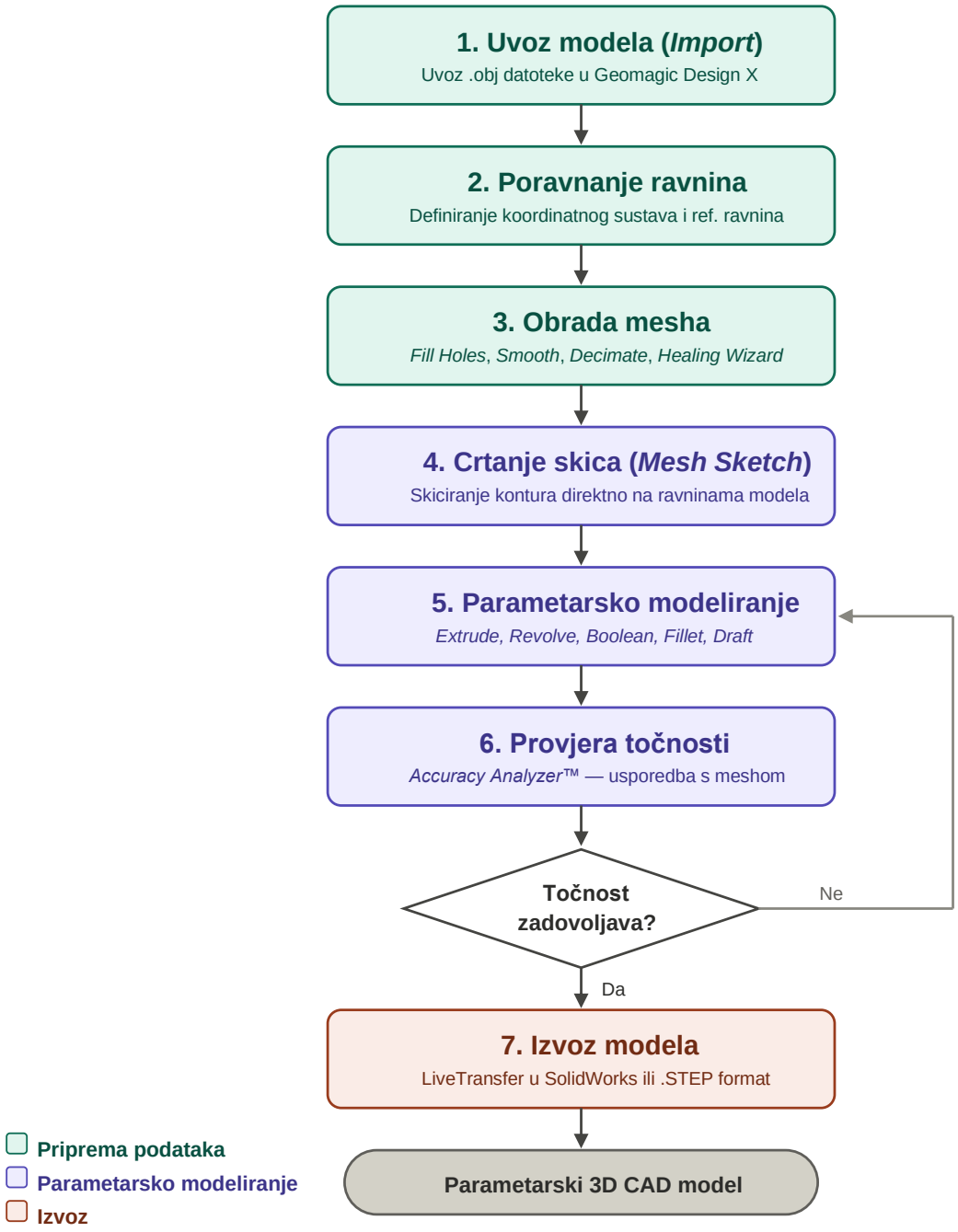
5. Postupak izrade parametarskog 3D modela

Nakon optimizacije, poligonalni model poklopca u .obj formatu uvezen je u program Geomagic Design X radi izrade parametarskog 3D CAD modela (Slika 9.).



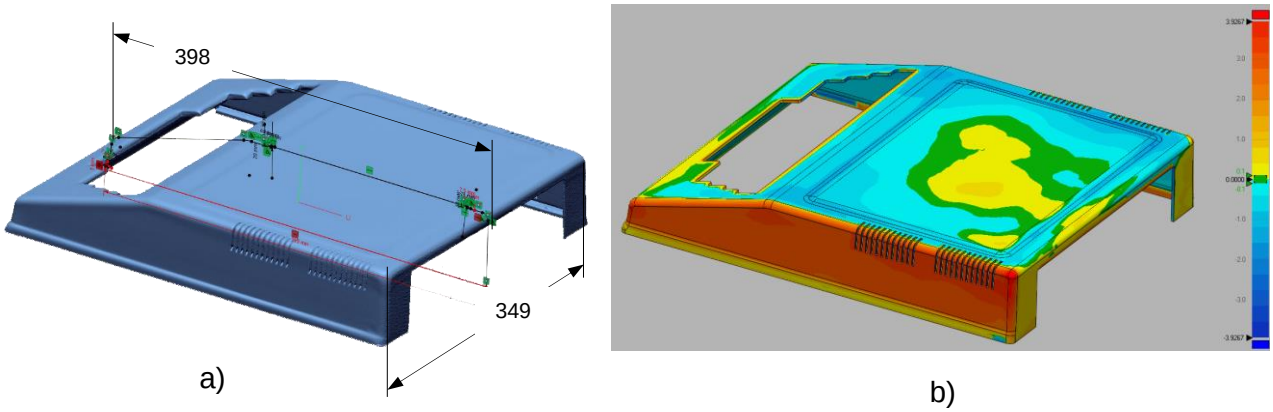
Slika 9. Glavni dijelovi grafičko sučelja Geomagic Design X

Koraci kod postupka izrade parametarskog 3D CAD modela u programu Geomagic Design X prikazani su na Slici 10. te se dijele u tri koraka: Pripremu podataka, koja obuhvaća uvoz poligonalnog modela, definiranje koordinatnog sustava i obradu mesha, Parametarsko modeliranje, u kojemu se na temelju skica izrađuju CAD tijela i provjerava točnost alatom te Izvoz gotovog 3D modela. Budući da je poligonalni model bio zadovoljavajuće kvalitete, obrade mesha (3) nije bila potrebna.



Slika 10. Dijagram postupka izrade 3D CAD modela

Na Slici 11(a) prikazan je parametarski 3D CAD model poklopca mikroračunala Galeb s vidljivom skicom (*Sketch*) koja je korištena kao osnova za izradu pojedinih značajki modeliranja. Nakon završetka izrade parametarskog CAD modela, provedena je analiza točnosti alatom *Accuracy Analyzer* usporedbom između originalnog poligonalnog modela i izrađenog CAD modela. Rezultati analize prikazani su na Slici 11 (b) u obliku karte devijacija (*Color Map*) koja vizualno prikazuje prostornu raspodjelu odstupanja između dvaju modela. Analiza je pokazala devijacije između CAD modela i originalnog poligonalnog modela u rasponu od 0,05 do 1,0 mm u većini zona, dok maksimalna lokalna devijacija iznosi 3,9 mm.



Slika 11. Parametarski 3d model s skicom (a) i analiza točnosti 3d modela (b)

6. Zaključak

U ovom radu prikazan je postupak digitalne rekonstrukcije poklopca mikroračunala Galeb primjenom tehnologije 3D skeniranja i reverzibilnog inženjeringa.

Postupak je proveden u tri glavna koraka: priprema i skeniranje fizičkog objekta 3D skenerom Artec Eva, obrada poligonalnog modela u programu Artec Studio 17 te izrada parametarskog 3D CAD modela u programu Geomagic Design X.

Rezultati rada pokazuju da kombinacija 3D skeniranja skenerom Artec Eva i parametarskog reverzibilnog inženjeringa programu Geomagic Design X predstavlja učinkovitu metodu za digitalnu rekonstrukciju tehničkih komponenti, posebice u slučajevima kada originalna projektna dokumentacija nije dostupna.

Uzrok visokih lokalnih odstupanja od 3,9 mm je geometrijska asimetrija fizičkog uzorka. Mjerenjem je utvrđeno da je jedna bočna stranica poklopca znatno više skošena od suprotne strane, što je posljedica nepreciznosti postupka izrade pomoću vakuumskog oblikovanja (*Vacuum Forming*) samog poklopca.

Budući da je pri izradi parametarskog CAD modela primijenjena simetrična konstrukcija kao tehnički ispravno rješenje, odstupanja između CAD modela i poligonalnog modela na bočnim stranicama su povećana. Dobiveni parametarski CAD model poklopca mikroračunala Galeb omogućuje daljnju analizu, rekonstrukciju i eventualnu ponovnu proizvodnju ove rijetke komponente hrvatske računalne baštine

7. Literatura

[1] Helle, Robin H.; Lemu, Hirpa G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control // *Materials Today: Proceedings*, 45(2021), 6; 5255–5262. (ISSN 2214-7853)

[2] Švoger, Siniša; Busija, Zoran; Mađerić, Damir; Lukman, Dino. Integracija laserskog 3D skeniranja i CAD alata u postupku digitalne rekonstrukcije unutrašnjosti vozila // *23rd Natural Gas, Heat and Water Conference* / Raos, Pero (ur.). (ISSN 1849-0638). Osijek: Sveučilište u Slavonskom Brodu, 24.-26.09.2025. str. 278-287

[3] Kruljac, Krunoslav. „Galeb" polijeće 11. studenoga // Varaždinske vijesti, godina XXXVIII(1982.), 1971; str. 9.
Dostupno na: https://library.foi.hr/lib/knjiga.php?B=1&item=N00003 (19.6.2026)

[4] Rakshit, Amit. Overview on Reverse Engineering // Evolutions in Mechanical Engineering, 4(2023), 3; EME.000590. (ISSN 2640-9690)

[5] Bartolić, Ljerka. Strojarski riječnik energetskog strojarstva i osnova strojarstva. Zagreb: Školska knjiga d.d., 2007. (ISBN 978-953-0-40209-6)

[6] https://topomatika.hr/usluge/reverzibilno-inzenjerstvo/ (19.6.2026.)

[7] https://www.3dskeniranje.hr/ (19.6.2026.)

[8] Vukašinović, Nikola; Duhovnik, Jože. Advanced CAD Modeling: Explicit, Parametric, Free-Form CAD and Re-engineering. Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2019. (ISBN 978-3-030-02398-0) (Chapter 7 Introduction to Reverse Engineering)

[9] Eilam, Eldad. Reversing: Secrets of Reverse Engineering. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2005. (ISBN 978-0-7645-7481-8) (Chapter 1 Foundations)

[10] https://www.enciklopedija.hr/clanak/kljunasto-mjerilo (19.6.2026)

[11] Gary C., Confalone; John, Smits; Thomas, Kinnare. 3D Scanning for Advanced Manufacturing, Design, and Construction. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2023. (ISBN 9781119758556) (Chapter 6 Reverse Engineering for Industrial and Consumer Applications)

[12] Bartol, Kristijan; Bojanić, David; Petković, Tomislav; Pribanić, Tomislav. A Review of Body Measurement Using 3D Scanning // IEEE Access, 9(2021); 67281-67301. (ISSN 2169-3536)

[13] Haleem, Abid; Javaid, Mohd; Singh, Ravi Pratap; Rab, Shanay; Suman, Rajiv; Kumar, Lalit; Khan, Ibrahim Haleem. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview // *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 3(2022); 161-171. (ISSN 2666-3074).

[14] https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva (21.6.2026.)

Otpornost premaza na abrazijsko trošenje
Resistance of top coats to abrasive wear

T. Šolić[1,*], D. Marić[1], S. Suhi[2], R. Cipar[1], I. Samardžić[1]

[1]Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska
[2]Stanica za tehnički pregled CVH STP H-001, Vukovar, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: tsolic@unisb.hr

Sažetak
U radu je provedeno ispitivanje otpornosti premaza na abrazijsko trošenje. Ukoliko se za zaštitu konstrukcije koriste organski premazi, aplicirani premazni sustav sastoji se uglavnom od temeljnog i završnog premaza. Jednako kako temeljni sloj mora osigurati dobra adhezijska svojstva i na sebe preuzeti najveći dio zaštite od razvoja korozijskih mehanizama, tako i završni sloj ima određene zadaće. Jedna od njih je osigurati otpornost na trošenje. Kako bi se ukazala važnost spomenutog svojstva, ali isto tako i potreba odabira premaza odgovarajućih karakteristika, provedena su eksperimentalna ispitivanja. Završni premazi različitih karakteristika podvrgnuti su abrazijskom trošenju na uređaju taber abrazer. Pod kontaktnim djelovanjem ispitnog trna i uzoraka s apliciranim premazima, ustanovljeno je kako postoji razlika u otpornosti na abrazijsko trošenje.

Ključne riječi: korozija, površinska zaštita, završni premaz, abrazijsko trošenje, taber abrazer

Abstract
This paper investigates resistance of coating systems to abrasion, i.e. to abrasive wear. Organic coatings used for surface protection consist mainly of a primer and a top coat. Both the primer and the top coat have to provide good adhesion properties to deliver protection against corrosion. Moreover, the top coat has to be resistant to wear. Experimental tests are carried out in order to test the abrasive wear resistance of coating, and to emphasise the importance of that property in protection of metal surfaces. Various top coats of different properites are subjected to abrasive wear on a taber abraser device. Experiment results obtained by the taber abraser method proved that there is a difference in resistance of top coats to abrasion wear.

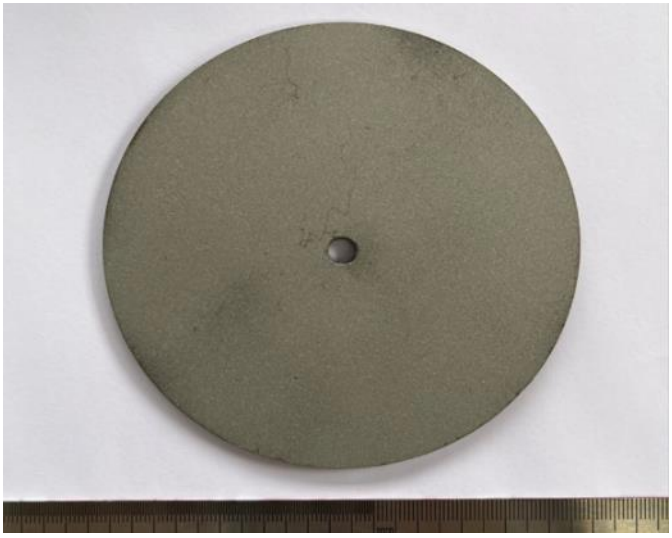
Key words: corrosion, surface protection, top coat, abrasion, taber abraser

1. Uvod
Korozijski mehanizmi prisutni su u svim eksploatacijskim fazama konstrukcijskog materijala [1-3]. Negativan trend razvoja istih i velike financijske gubitke, moguće je spriječiti odabirom adekvatne tehnologije površinske zaštite [4, 5]. Ukoliko se za zaštitu odaberu organski

premazi čije se djelovanje temelji na načelu stvaranja barijere između agresivne okoline i štićenog materijala, bitno je poznavati karakteristike svakog sloja premaznog sustava kako bi se mogao postići puni zaštitni potencijal [6]. Prema namjeni i ulozi u premaznom sustavu, premazi mogu biti temeljni, međupremazi i završni. Budući su predmet ovog rada i istraživanja završni premazi, bitno je poznavati njihove karakteristike. Završni premazi tako moraju osigurati otpornost premaznog sustava, tvoriti prvu barijeru prema utjecajima okoline, osigurati otpornost na različite reaktante iz okoline (kiselina, voda, itd.), osigurati otpornost na trošenje te lijep izgled [7]. Ono što je od posebnog interesa za područje ispitivanja ovog rada je upravo otpornost na trošenje. Za pretpostaviti je kako će završni sloj koji je direktno izložen okolini, prije ili kasnije doći u kontakt s drugima konstrukcijskim elementom ili predmetom iz okoline čime bi se potom mogla narušiti njegova homogenost, postojanost, a samim time i funkcionalnost [8]. Prema tome, provedbom eksperimentalnog dijela rada cilj je pokazati da različiti premazi imaju različite karakteristike kada je u pitanju otpornost na trošenje, odnosno da pri projektiranju površinske zaštite i odabiru premaza, tome svojstvu treba pridodati dosta pažnje.

2. Eksperimentalni dio

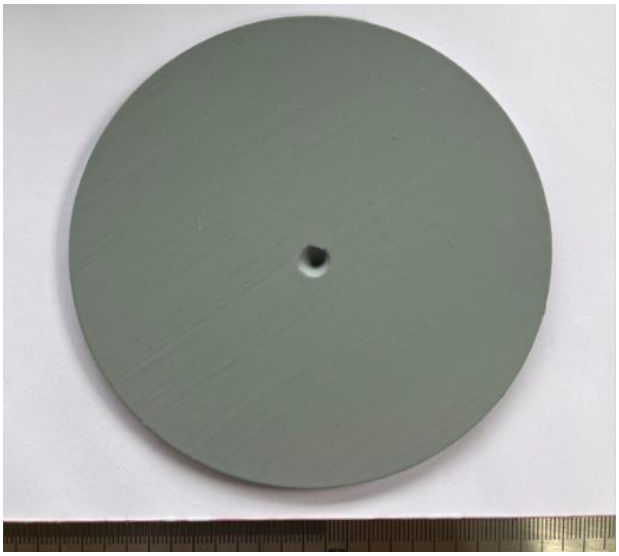
Za provedbu eksperimentalnih ispitivanja, kao osnovni materijal na koji je apliciran zaštitni premazni sustav, korištene su ploče izrađene od konstrukcijskog čelika S235 debljine 3 mm. Pomoću plazma uređaja izrezano je 12 ispitnih uzoraka u obliku diskova promjera 105 mm. Nakon rezanja ispitni uzroci su podvrgnuti mehaničkoj obradi mlazom abraziva (pjeskarenju do klase Sa 2.5) kako bi se otkloniti nastali korozijski produkti te kako bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta površine za aplikaciju premaza. Ispitni uzorak zadovoljavajuće kvalitete pripremljene površine prikazan je na slici 1.



Slika 1. Ispitni uzorak nakon mehaničke obrade mlazom abraziva (pjeskarenja)

Nakon pripreme, aplicirani su temeljni i završni premazi. Aplicirani premazni sustavi podijeljeni su u četiri grupe definirane slovima A, B, C i D. Premazni sustavi su tako nazvani kako bi se izbjeglo reklamiranje jednog proizvođača ili samog premaza, odnosno

kako se ne bi moglo pretpostaviti da se radi o preferiranju pojedinih premaza ispred drugih. Svi korišteni premazi su namijenjeni širokoj potrošnji i dostupni su u svim specijaliziranim trgovinama, a pri nabavi istih vodilo se računa o tome da svi temeljni premazi (sivi) te svi završni premazi (zeleni) budu iste nijanse. Dakle, još jednom je samo važno napomenuti da se ovako šifriran naziv premaza koristio isključivo kako se pažnja ne bi svela na karakteristike premaza određenog proizvođača, nego kako bi projektanti tehnologije površinske zaštite uvidjeli važnost ispravnog odabira premaznog sustava. Drugim riječima, kako bi se uvidjelo da razlika u otpornosti završnih premaza na trošenje itekako postoji i da o tome treba voditi računa. Iz istog tog razloga za korištene premaze nisu navedene nikakve karakteristike poput kemijske osnove, vrste veziva, sadržaja punila i pigmenata itd. Analizirati dodatno pojedinačne stavke kemijskog sastava pojedinih premaza na samu otpornost prema abrazijskom trošenju može se napraviti u budućim istraživanjima gdje bi se osigurao detaljniji znanstveni pristup i prikaz rezultata. Svaki premazni sustav (svaka grupa) ima 3 uzorka na koje su se aplicirali temeljni i završni premazi. Prilikom aplikacije premaza, posebno je trebalo paziti da debljine premaza u svim premaznim sustavima budu podjednake kako za temeljne tako i za završne premaze. Temeljni premaz se kod sva četiri slučaja aplicirao u iznosu od 60 ±10 µm (debljina suhog filma premaza), dok se završni sloj aplicirao u iznosu od 30 ± 10 µm (debljina suhog filma premaza). Na slikama 2 i 4 prikazani su ispitni uzorci nakon aplikacije temeljnog, odnosno završnog premaza, a slike 3 i 5 prikazuju mjerenje debljine suhog filma temeljnog, odnosno završnog premaza (koja je razlika debljine premaznog sustava i debljine temeljnog premaza).



Slika 2. Ispitni uzorak nakon apliciranog temeljnog sloja premaza

Slika 3. Mjerenje debljine suhog filma temeljnog premaza

Mjerenje debljine suhog filma premaza izvođeno je uređajem marke Elcometer, a kako je na prethodnoj slici vidljivo, isti daje spektar izmjerenih podataka. Tako se na njemu može očitati da je za ispitni uzorak provedeno 15 mjerenja iz kojih je proizašla srednja vrijednost debljine premaza u iznosu od 61,07 µm. Najmanja izmjerena vrijednost debljine suhog filma premaza iznosila je u ovom slučaju 54,1 µm, dok je najveća bila 65,3 µm. Ono što je važno napomenuti, to je da su sve izmjerene vrijednosti bile u toleriranim granicama.

Slika 4. Ispitni uzorak nakon apliciranog završnog sloja

Slika 5. Mjerenje debljine suhog filma nakon aplikacije završnog premaza

Nakon aplikacije završnog premaza mjerenjem debljine suhog filma dobio se ukupni iznos premaznog sustava. Da bi se dobila konkretna vrijednost samo završnog sloja, potrebno je od ukupne izmjerene vrijednosti za taj uzorak oduzeti vrijednost prethodno izmjerene debljine temeljnog sloja. U tablici 1 tako su prikazane sve mjerenjem dobivene srednje vrijednosti debljina suhog filma temeljnog i završnog premaza za sve promatrane ispitne uzorke.

Tablica 1. Debljine suhog filma temeljnog i završnog premaza

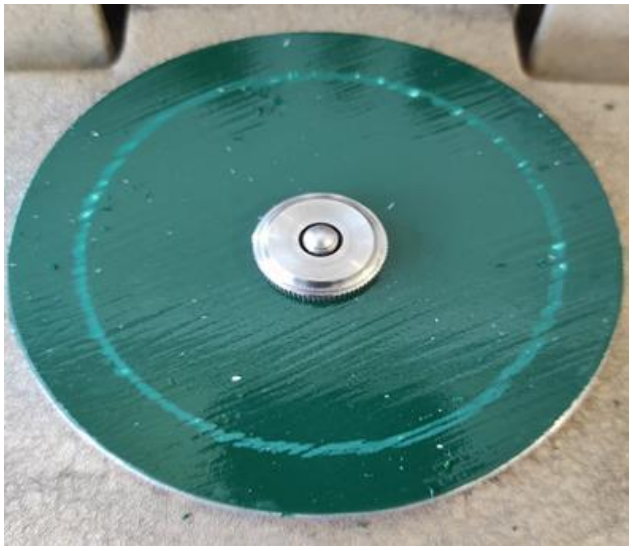
UZORAK	TEMELJNI SLOJ Debljina suhog filma premaza / µm	ZAVRŠNI SLOJ Debljina suhog filma premaza / µm	PREMAZNI SUSTAV
1.1	58,65	31,11	A
1.2	67,84	32,94	
1.3	61,84	30,93	
2.1	61,07	35,18	B
2.2	57,23	31,97	
2.3	58,29	34,12	
3.1	58,27	31,33	C
3.2	62,53	30,42	
3.3	56,73	32,37	
4.1	65,47	29,53	D
4.2	66,35	32,14	
4.3	61,14	33,38	

Otpornost premaza na abrazijsko trošenje potom je ispitana na uređaju po nazivu taber abrazer (slika 6). To je uređaj koji rotira uzorak dok ga stacionarni trn mehanički opterećuje. Postavljanjem utega na trn osigurana je ispitna sila od 9,81 N (što odgovara masi od 1 kg kojom je opterećen uzorak). Samo ispitivanje provedeno je u uvjetima sobne temperature,

a iako ovo nije standardiziran način ispitivanja otpornosti premaza na abrazijsko trošenje, bitno je da su za sve ispitne uzorke osigurani jednaki ispitni uvjeti pa se samim time navedeni uređaj prilagodio potrebama ovog eksperimentalnog rada.

Slika 6. Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja (taber abrazer)

Prilikom rotacije ispitnih uzoraka, uređaj bilježi vrijednost punih krugova koje je uzorak napravio. Samo ispitivanje otpornosti premaza na trošenje prema tome se provodilo na način da je uzorak rotiran i opterećen ispitnim trnom dok god je završni premaz bio postojan. Onog trena kada je završni premaz potrošen do te mjere da se vizualno mogla uočiti čista boja temeljnog premaza, ispitivanje je prekinuto broj ciklusa, tj. krugova koje je uzorak prije toga napravio, definiran je kao svojstvo koje opisuje otpornost na abrazijsko trošenje. Slika 7 prikazuje ispitni uzorka nakon završenog postupka ispitivanja na prethodno opisanom uređaju.

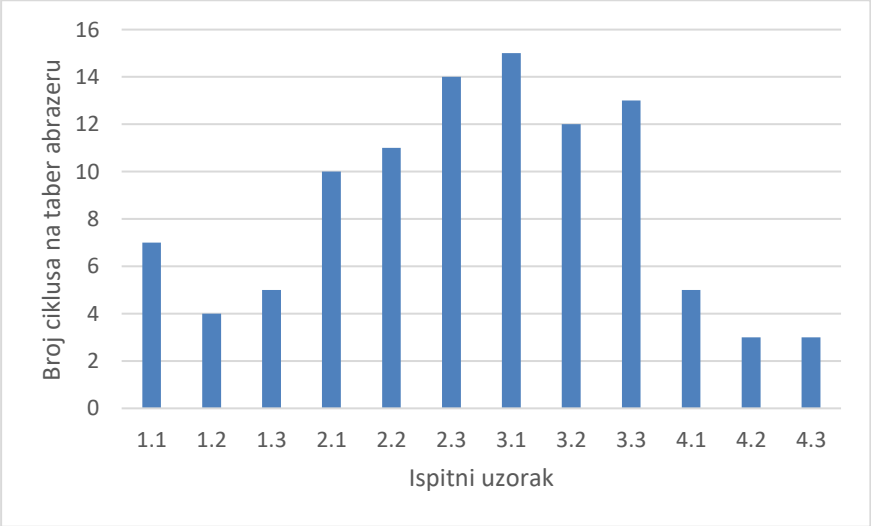


Slika 7. Ispitni uzorak nakon ispitivanja na trošenje

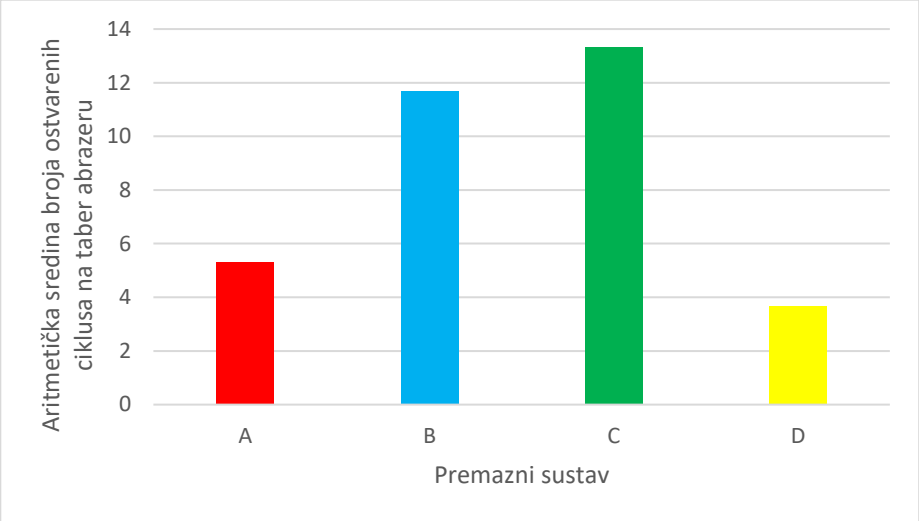
Rezultati provedenih ispitivanja otpornosti premaza na abrazijsko trošenje prikazani su u tablici 2 te grafički slikama 8 i 9.

Tablica 2. Prikaz rezultata provedenih ispitivanja

UZORAK	PREMAZNI SUSTAV	Broj ciklusa	Aritmetička sredina broja ostvarenih ciklusa
1.1	A	7	5,33
1.2		4	
1.3		5	
2.1	B	10	11,67
2.2		11	
2.3		14	
3.1	C	15	13,33
3.2		12	
3.3		13	
4.1	D	5	3,67
4.2		3	
4.3		3	



Slika 8. Grafički prikaz provedenih ispitivanja za sve ispitne uzroke na taber abrazeru



Slika 9. Grafički prikaz aritmetičkih sredina broja ostvarenih ciklusa na taber abrazeru

Na temelju provedenog ispitivanja i rezultata iz tablice 2 te slika 8 i 9, vidljivo je da svaki premazni sustav ima različitu otpornost na abrazijsko trošenje. Najmanju otpornost u ovom slučaju ima premazni sustav D kojemu je prosječni broj ciklusa kada će se potpuno otkloniti završni i jasno vidjeti temeljni premaz iznosi 3,67 (srednja vrijednost sva tri ispitana uzorka), dok premazni sustav C ima najveću otpornost te njegov prosječni broj ciklusa iznosi 13,33. Iz ovih podataka, dokazano je da različiti premazni sustavi daju različite otpornosti na mehanička oštećenja te se to treba uzeti u obzir kod odabira premaznog sustava kada se projektira tehnologija površinske zaštite, pogotovo kada se pretpostavlja da će konstrukcija biti podložna nekoj vrsti mehaničkog utjecaja.

3. Zaključak

Postoji puno oblika korozijskog razaranja koji mogu različito djelovati na materijal, ali na kraju svi uzrokuju velika oštećenja i otkaze. Zbog toga je do danas razvijeno mnoštvo različitih metoda kako bi se materijal ili konstrukcija mogli zaštititi. Svaka od tih metoda zaštite primjenjuje se ovisno o utjecaju različitih čimbenika koji djeluju na materijal ili konstrukciju u uvjetima eksploatacije. Danas se najčešće koristi metoda zaštite organskim premazima, gdje je gotovo 75% metalnih konstrukcija je tako zaštićeno. Uz poznate činjenice kako temeljni premaz mora imati najveću mogućnost antikorozivnog učinka u zaštiti konstrukcije, ovim radom željela se skrenuti pozornost na to da i ostali slojevi u premaznom sustavu također ne smiju biti zanemareni prilikom ispravnog odabira. Prilikom projektiranja tehnologije površinske zaštite, pogotovo ako se pretpostavlja da će konstrukcija biti mehanički opterećenja, treba paziti na odabir premaznog sustava, jer je u eksperimentalnom dijelu dokazano da različiti završni premazi imaju različite otpornosti na abrazijska trošenja. Prema tome, ispravnim odabirom svih komponenti u premaznom sustavu koje će najbolje dogovarati određenim eksploatacijskim uvjetima znatno će se smanjiti ekonomski gubici kroz sprječavanje razvoja korozijskih mehanizama, a samim time i povećati će se ukupna sigurnost i duži eksploatacijski vijek iste.

Zahvala
Ovaj znanstveni rad financiralo je Sveučilište u Slavonskom Brodu u sklopu institucionalnog istraživačkog projekta "Poboljšanje kvalitete proizvodnih procesa korištenjem modernih tehnoloških rješenja", financiranog sredstvima Europske unije - NextGenerationEU. Izneseni stavovi i mišljenja samo su autorova i ne odražavaju nužno službena stajališta Europske unije ili Europske komisije. Ni Europska unija ni Europska komisija ne mogu se smatrati odgovornima za njih.

4. Literatura

[1] Montoya, L. F.; Contreras, D.; Jaramillo, A. F.; Carrasco, C.; Fernández, K.; Schwederski, B.; Rojas, D.; Melendrez, M. F. Study of anticorrosive coatings based on high and low molecular weight polyphenols extracted from the Pine radiata bark // *Progress in Organic Coatings*, 127(2019); 100-109.
[2] Chen, B.-Q.; Zhang, X.; Soares, C. G. The effect of general and localized corrosion on the collapse pressure of subsea pipelines // *Ocean Engineering*, 247(2022); 110719.
[3] Shojai, S.; Schaumann, P.; Braun, M.; Ehlers, S. Influence of pitting corrosion on the fatigue strength of offshore steel structures based on 3D surface scans // *Internation Journal of Fatigue*, 164(2022); 107128.
[4] NACE International. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. Texas, USA, 2016.
[5] Okyere, Ms. S. Corrosion protection for the oil and gas industry: pipelines, subsea equipment, and structures. CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, Unites States of America, 2019.
[6] Nikravesh, B.; Ramezanzadeh, B.; Sarab, A. A.; Kasiriha, S. M. Evaluation of the corrosion resistance of an epoxy-polyamide coating containing different ratios of micaceous iron oxide/Al pigments // *Corrosion Science*, 53(2011), 4; 1592-1603.
[7] Juraga, I.; Alar, V.; Stojanović, I. Korozija i zaštita premazima. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
[8] Xiang, G.; Zheng, H.; Lin, B.; Wang, Y.; Zhang, H.; Wang, D.; Tang, J; Liu, L.; Wang, F. Modified basalt material reinforced organic coatings: A review // *Corrosion Communications*, 13(2024); 37-48

Dizajn pametne svjetiljke temeljen na tenzigracijskoj strukturi uz primjenu aditivne proizvodnje
Design of a Smart Lamp Based on a Tensegrity Structure Using Additive Manufacturing

L. Bićanić[1], D. Stavljenić[1], J. Groš[1,*], D. Fraj[1]

[1]Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, 10000 Zagreb, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: jgros@tvz.hr

Sažetak
Ovaj rad predstavlja dizajn sobne svjetiljke temeljene na tenzigracijskoj strukturi, uz primjenu estetskih načela litofana. Projekt objedinjuje različita područja STEM znanosti – od strojarstva do elektrotehnike i industrijskog dizajna – kroz uporabu 3D modeliranja, programiranja mikrokontrolera za daljinsko upravljanje te iterativnih metoda dizajna. Projekt je realiziran korištenjem SolidWorksa za modeliranje, Autodesk Fusiona za simulacije statičkih struktura te Tasmota firmwarea za bežično upravljanje. Konačni proizvod demonstrira primjenu aditivne proizvodnje u inženjerstvu, pametnim tehnologijama i umjetnosti.

Ključne riječi: tenzigracijska struktura; aditivna proizvodnja; litofan; simulacija statičkog naprezanja

Abstract
This thesis presents the design of a room lamp based on tensegrity structure with the aesthetics of lithophanes. The project incorporates different fields of stem sciences from mechanical engineering to electrical and industrial design through the use of 3D modeling, remote control microcontroller programing and the iterative design methods. The project is created with the use of SolidWorks for modeling, Autodesk Fusion for static structure simulations, and Tasmota firmware for wireless control. The final product shows the use of additive manufacturing in engineering, smart technologies and art.

Key words: tensegrity structure; additive manufacturing; lithophane; static stress simulation

1. Introduction

Since Thomas Edison radically changed the world with his introduction of direct current, humanity stopped relying on the nature to provide the light, soon every home had artificial lighting and humans could continue their work long after the dark. But since then, the use of lamps has been changed, not only do they present the source of light but also the art in the home design [1].

Tensegrity incorporates the use of compressive and tensile loads which achieve structural stability with minimal materials. Isolated, rigid compression pieces (bars) are suspended by the continuous tension (cables). This ensures that the structure is lightweight, strong, and after outside force is stopped the system comes back to the initial position. Tensegrity systems rely on gravity and the weight of the structure to keep it stable [2][3].

The use of Lithophanes in this project is to add to the visual appeal. The way that lithophanes work is by the representations of colors in 256 different shades of gray. When the picture is transferred to three-dimensional object each of the shades represents certain thickness of layers, the thinnest layer representing 0 which on greyscale is white to the 255 which represents black [4][5].

Additive manufacturing has revolutionized manufacturing and prototyping by enabling creation of complex geometries with low costs and big speed. Also, since it is the type of manufacturing which is adding materials to create a product so it reduces material waste and offers a lot of space for creation of multiple different designs in quick time which can be tested and later decided upon [6].

2. Materials and Methods

2.1. Morphological analysis

Before the structural design it is important to analyze the important functions of a product. Main components of this project are: base form, picture form, cable type, cable fastening, material power source and type of control. To analyze all of the above instead of making different prototypes all variables are placed in the matrix table first created by Swiss scientist Fritz Zwicky [7].

Table 1. Morphological matrix [8]

Base structure	Lithophane structure	Cable type	Product material	Cable fastening	Power source and control
Square	Square	Fishing line	PLA	Knot	City grid and mechanical switch
Circle	Cylinder	Wire	PETG	Hook	City grid and remote control
Hexagon	Hexagon	Rope	TPU	Fastener	Battery power and mechanical switch
Triangle	Triangle	Chain	ABS	Weight	Battery power and remote control

Table 1. shows all variables and corresponding color shows one of the iterations of the design. The first iteration (blue) of the design incorporates square shapes of the base and

lithophane it is made out of PETG (polyethylene terephthalate glycol). Tensile components are wires and are fastened with a weight, system is battery powered and remote controlled with the microcontroller and smartphone. The second iteration (yellow) is based on round shapes; the base is a circle so lithophanes are cylindrical shapes. Bases are connected with a fishing line which is fastened by a knot. The power source is battery and the lights are controlled by a mechanical switch and it is made out of PLA (Polylactic Acid). The third iteration (red) has a triangle shaped base and hexagon lithophanes. It is connected with a chain which is suspended on the hooks the material of 3D printed parts is ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) the source of power comes straight from the outlets connected to the city grid, and it is turned on and off with a mechanical switch.

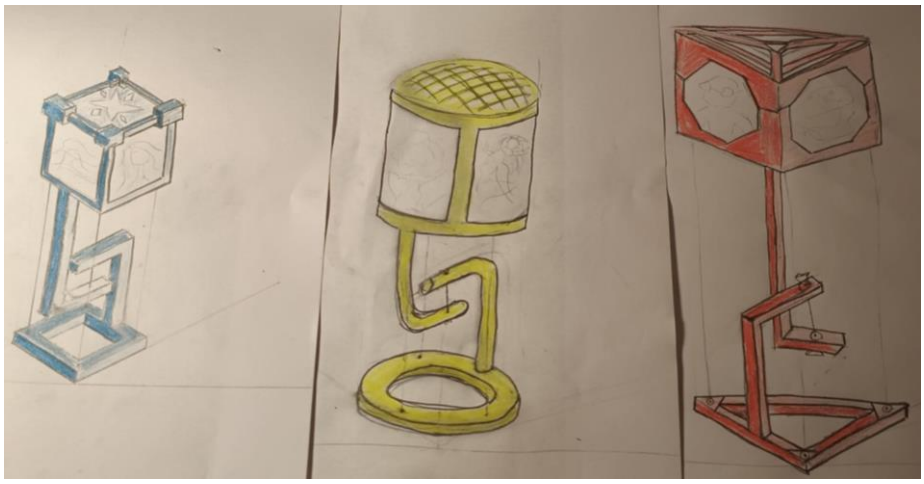


Figure 1. Sketch of three design iterations [8]

Figure 1. represents sketches of the three design iterations. After continued inspection the best components were chosen and incorporated into the final design. This includes the square base and lithophanes which are connected with a rope tightened in a knot on a hook. Chosen material is PETG (polyethylene terephthalate glycol) because of its strength and resilience to deformation. System is powered with a battery source and is remotely controlled with a smartphone using a microcontroller and that ensures low current and voltage, and low temperature.

2.2. Structural design

The structural design consists of modeling four parts: Bottom base, top base, casing, and case lid. Top and bottom base are the same parts that will be connected with a rope to form a tensegrity structure, the only difference is that top base has 4 equally placed positioning pins. The casing is the main part of the lamp because it holds all of the electronic parts and lithophanes, and the finishing part is the case lid holding all lithophanes in one place, and covering the electronics out of hands reach. Parts are modeled in Dassault systems SolidWorks with a simple extruding and cutting functions. Figure 2. shows assembled model of a lamp. Base dimensions are 100x100x100 mm with a center pole 65 mm in length which will hold the main tensile rope. Casing also has a square base (100x100 mm) with four poles (80 mm) on each side with fittings that will hold the lithophanes in position. In the center is a hollow cylinder that holds battery and microcontroller in place and around it LED strip will

be placed so it lights all four lithophanes equally. Case lid (100x100x30 mm) is a simple flat plane with lithophane fittings on bottom side and triangle pattern the top to add visual effect.

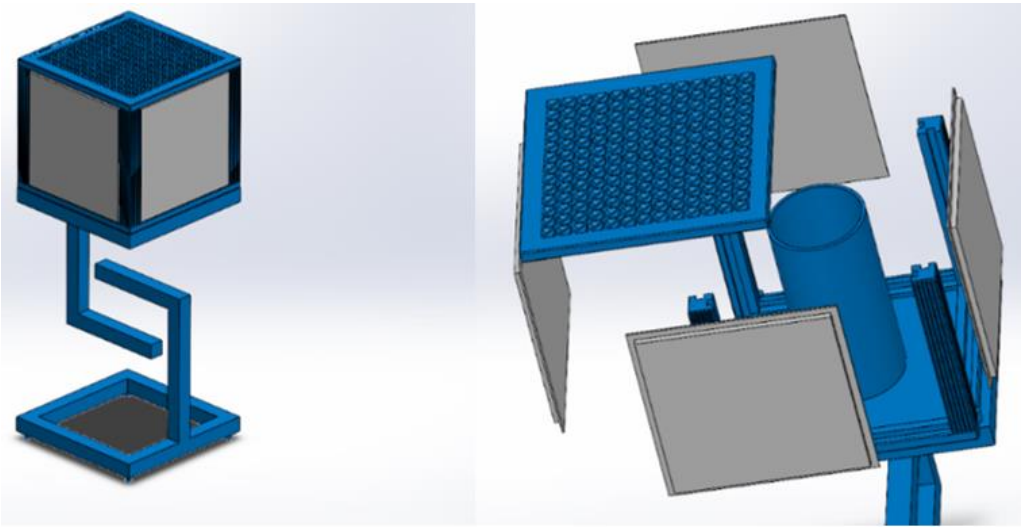


Figure 2. 3D model of a lamp

Lithophanes are generated with the use of lithophane software in this case ItsLitho. Figure 3. shows user interface of ItsLitho software. The photo is first cropped in 1:1 ratio to ensure that lithophane is a square. Under the edit option it is important to change the contrast and the shade of the picture and also the sharpness. Contrast bigger contrast ensures bigger difference between the layers and clean manufacturing. When sharpness is decreased it blends the layers together to lose sharp movement of the printer nozzle. Base dimensions of a lithophane are 84x84 with a 3 mm edge on each side that fits in the casing poles. Thickness of the lithophane varies between 0.8 mm for white and 3.2 mm for black.

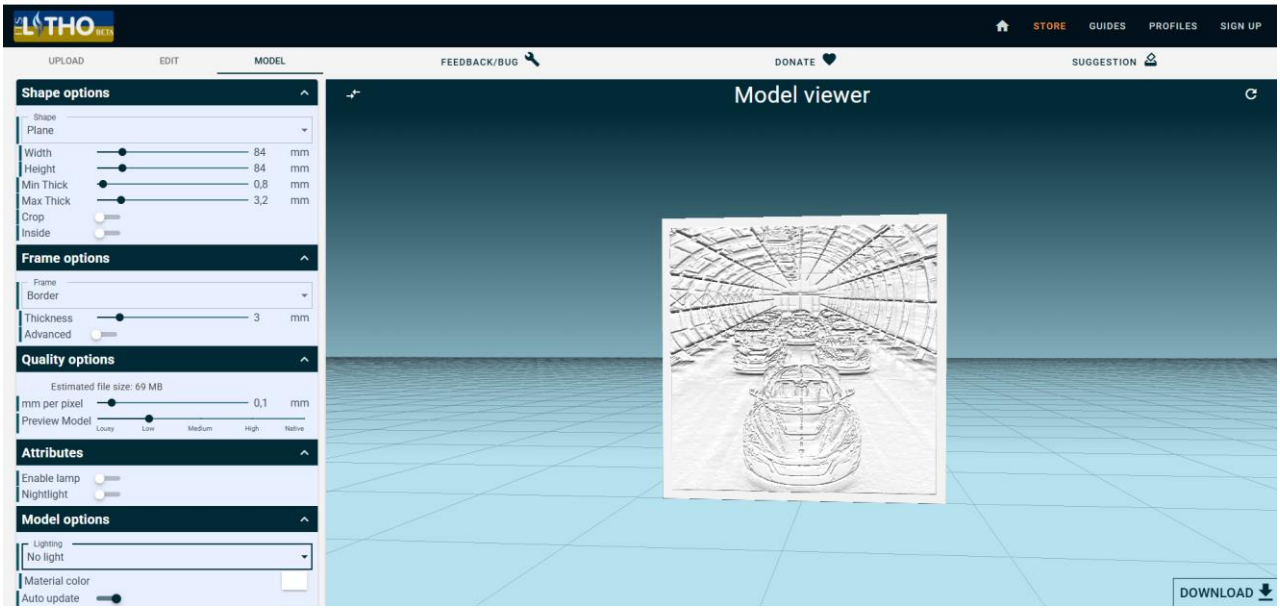


Figure 3. User interface of ItsLitho software [8]

2.3. Additive manufacturing

After the initial design is done the first step is to export an STL (Stereolithography) file. The STL format has long been the primary standard used for three-dimensional printing [9][10]. It turns a 3D model in triangle mesh grid with coordinates of each tip of the triangle. Figure 4. shows the model of the casing turned in an STL file with total of 10302 triangles to represent the surfaces of the model. STL file is than opened in slicer program in this case Bambu Studios.

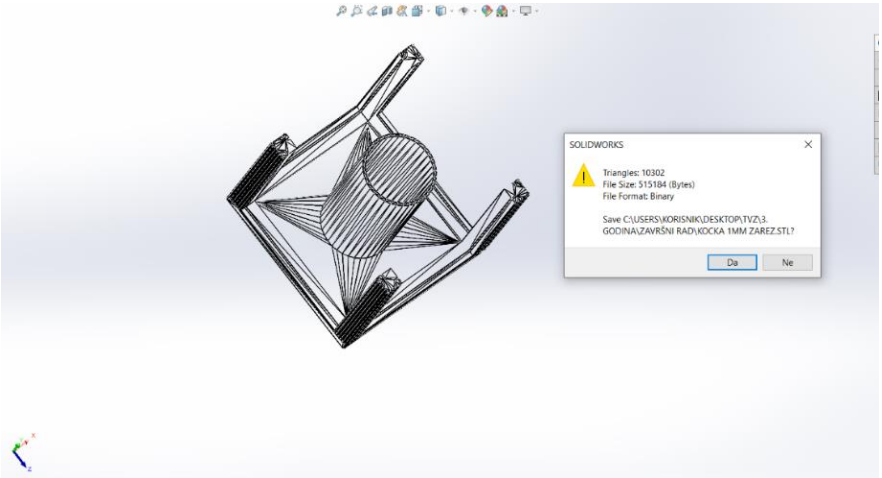


Figure 4. STL file of the casing [8]

Most important parameters that need to be set is the material (in this case PETG) and it automatically sets temperature of nozzle to 220 °C and the temperature of printer bed to 70 °C. Initial layer printing speed is set to 20 m/s so it would adhere to the printing surface and to stop curling that occurs due to cooling of the printed part and retraction of material. Layer height is 0.12 mm and infill is 50% this establishes a smooth surface and infill makes sure that part has enough mechanical resistance to endure mechanical stress. Adding supports is essential in printing top and bottom base because they add extra material to make parts that are suspended in the air and would fall down due to gravity.

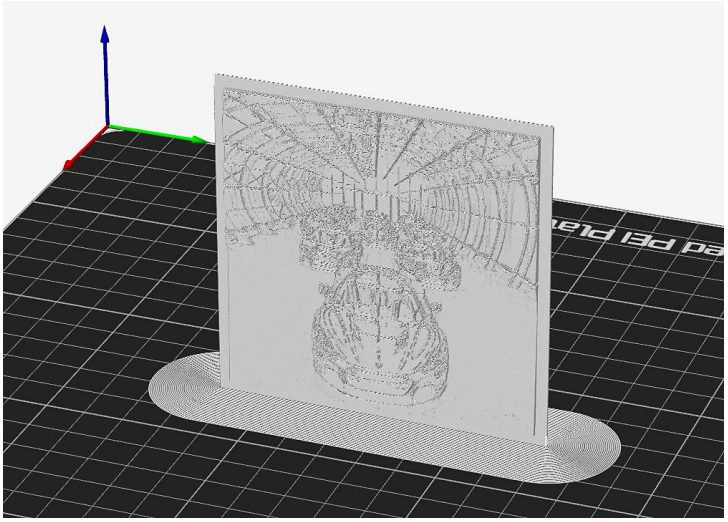


Figure 5. Sliced lithophane

Figure 5. shows sliced model of a lithophane it has vertical orientation during printing on account of low thickness and printing restrictions of 0.4 mm nozzle. If the lithophane is placed laying down on the surface the heated bed doesn't allow bottom layers to cool before top layers are placed and deposited layer doesn't solidify and molten material spreads and it results in loss of geometric accuracy. Layer height once again is 0.12 mm to create a smooth surface. Print speed needs to be reduced to 30 m/s, and infill should be solid or 99% to make sure that after the light shines it doesn't show the infill holes in the lithophane. Because of the vertical orientation, and small thickness of the edge, it is crucial to add a raft that will create more contact surface between the lithophane and printer bed. Even though there are some overhangs support is unnecessary since overhang distance is usually lower than 1.5 mm.

Figure 6. Assembled prototype of the tensegrity lamp

After all the parts are manufactured postprocessing is required. Supports and brims need to be removed and surfaces they were in contact with need to be sanded to create a smooth surface. Figure 6. shows assembled prototype. Screw hooks positions are measured and tightened top and bottom base are placed opposing each other, rope is measured and cut to the same lengths and tightened in a knot. To ensure horizontal positioning stability and equal lengths of the ropes, screw hooks are tightened and loosened to finetune the lengths. Casing sits on top of the positioning pins, lithophanes slide in the fasteners, and lid is placed on the top.

2.4. Design modifications

Figure 7. shows parts of the first design. The first iteration is functional although it has a lot of flaws, on the bases, screw hooks cannot be adjusted multiple times due to wear of the plastic parts and the ropes are difficult to cut in the same lengths and tied in equal knots. The casing had fitting along the pillars trough which was very difficult to insert the lithophanes. In the middle cylindrical shape doesn't have grooves to hold the LED strip in position. Electric parts don't have any air flow, so it is very likely that the components would overheat. The lid needed different fitting over the lithophanes because grooves were thin and hard to fit, also the borders of lithophanes are thin so they are prone to breaking.

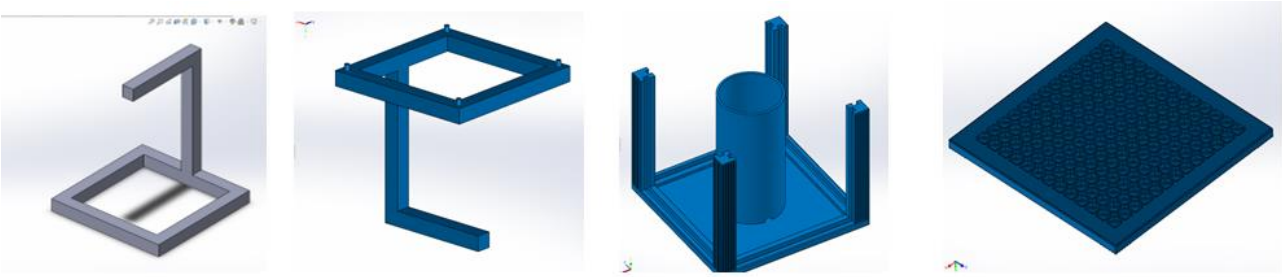


Figure 7. 3D models of initial design [8]

Figure 8. shows a new design of the parts. On the base, screw hooks are replaced with small holes and on the sides, it has bolt holes which will secure the fishing line in place. Base was also thickened and grooves were cut to help with the cooling and to add to the visual appeal.

The inside the casing is a cube with fileted edges so it is easier to place the LED strip, Grooves have been added to hold it in place, and cooling canals are added to ensure constant flow of air to avoid overheating. Inside the cube is square holder for microcontroller and a round holder for the battery. On the bottom of the casing grooves are added to help the air get out, and they match the grooves on the top base. Instead of the long fittings along the pillars two small tabs are added and they hold the lithophane in place while lowering stress on the pillars.

Lid fitting is changed from long thin grooves to corner brackets which sit on top of the pillars to ensure easy and firm fitting. Instead of the triangle pattern star pattern is added, it helps with air circulation, and when the lamp is turned on, star pattern is lighted on the ceiling and it adds to the overall visual aesthetic. Using a variable pattern small circles are added inside of the new logo.

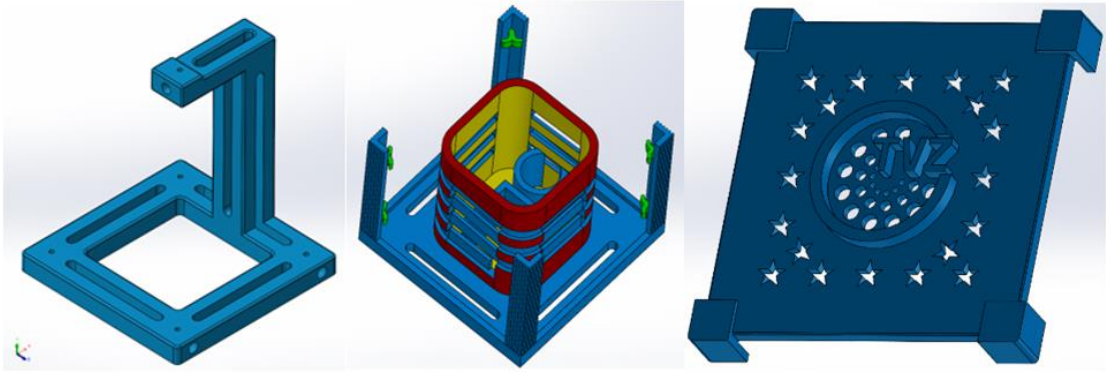


Figure 8. 3D models of the new design [8]

2.5. Microcontroller regulation

Light is emitted from a LED strip, connected to the microcontroller with a ESP8266 module that connects to any Wi-Fi network and can be regulated with a smartphone. Microcontroller is connected to an 18650 Li-ion battery and between them is a TIP 122 transistor which will regulate the electric current to have stable lighting without power loss. All the connecting wires are soldered and have thermal insulation to avoid contact with the exposed wires. Tasmota firmware is uploaded on microcontroller and using its own user interface Wi-Fi connection is setup, and type of regulation is set to the on/off button.

3. Results and discussion

The development of tensegrity lamp has been done through numerical analysis of the stress, structural redesign and prototype creation. This approach ensured mechanical reliability and improvements of functional design.

Static structural analysis confirmed that design is resilient to deformation under constant load ensuring that material is within its elastic range of deformation. However original design had localized stress which would eventually lead to fractures. Redesign removed those critical points, and added more mechanical functionality to the product such as cooling vents. Clear fishing line replaced traditional rope because of his smaller diameter and color which added to the floating look of the structure. Fishing line also has much better tensile strength so it could hold bigger loads. To ensure reliable fixation of the tension elements metallic threaded inserts are heated and inserted in the bolt holes, and headless screw secured fishing line in position and helped with fine leveling of the structure. Production of prototypes helped with designing tolerances of fittings.

Figure 9. shows final assembly of the finished product. Tensegrity structure is leveled although it has casing on top to represent the load. Addition of fishing lines gives it desired floating look while keeping stability. Lithophanes are backlighted to turn white relief into black and white pictures adding to the visual appeal of the final product. Additive manufacturing proved to be fine manufacturing tool for creating stable structure and creative aesthetic of consumer products.

Figure 9. Finished tensegrity smart-lamp [8]

4. Conclusion

This study demonstrates successful development of a tensegrity lamp using additive manufacturing and IoT control. This design shows that integrally tensioned structures can be applied in small-scale consumer products giving user a floating visual effect while ensuring mechanical stability.

Additive manufacturing helped create lightweight and visually attractive product but also ensured mechanical strength and dimensional accuracy. Iterative prototyping contributed to the optimization of the final product without the need of fabrication of entire product, making the costs lower and less time consuming.

Static structural simulation verified that design operates within elastic limits of the selected material. Simulation showed parts which needed to be changed so that stress of the materials is beneath the yield strength and also what can be removed to keep the elegant aesthetic. The results confirm that the tensegrity configuration effectively redistributes loads through balanced tensile and compressive elements. This validates the structural concept as a reliable solution for lightweight supporting frameworks.

The integration of lithophanes introduced an additional functional and aesthetic dimension to the product. High-resolution relief enables controlled light transmission and image visualization. This demonstrates the potential use of additive manufacturing as a way to merge engineering functionality and artistic expression.

Incorporation of a microcontroller with wireless module enables remote-control. Open-source Tasmota firmware implements low-cost IoT solution in consumer products with ease while maintaining system simplicity and user adaptability.

In conclusion, this thesis demonstrates the potential of combining tensegrity structures, additive manufacturing, and small electronics into engineering solution for art and design. The developed product serves as a concept for future applications in small home appliances and lighting systems. Future research may focus on long-term material behavior, integration of sensor-based functionalities and further exploration of different designs.

5. References

[1] Lexicographic Institute Miroslav Krleža. Žarulja [Light bulb], 2013-2026, online edition, https://www.enciklopedija.hr/clanak/zarulja

[2] Gomez-Jauregui, Valentin. Tensegrity structures and their application to architecture. The School of Architecture,Queen's University, Belfast, 2004.

[3] Bansod, Yogesh Deepak; Nandanwar, Deepesh; Burša, Jiří. Overview of tensegrity – I: basic structures // Engineering MECHANICS, 21(2014), 5; 355–367

[4] Carney, Margaret. Lithophanes. Schiffer Publishing Ltd, 2008(ISBN 978-076-4330-19-3)

[5] Suwanprateeb, Jintamai; Suwanpreuk, W. Development of translucent and strong three dimensional printing models // Rapid Prototyping Journal, 15(2009), 1; 52–58. (doi:10.1108/13552540910925063)

[6] Godec, Damir; Gonzalez-Gutierrez, Joamin; Nordin, Axel; Pei, Eujin; Ureña Alcázar, Julia. A Guide to Additive Manufacturing. Springer, 2022. (ISBN 978-3-031-05862-2)

[7] Ritchey, Tom. General Morphological Analysis* A general method for non-quantified modelling. Swedish Morphological Society, 2002

[8] Bićanić, Luka. Construction of a room lamp using additive manufacturing technology. Zagreb: Zagreb University of Applied Sciences, Undergraduate Professional Study in Mechanical Engineering, Final thesis, 2025

[9] Hull, Charles W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, 1986 (US4575330A)

[10] Doan, Hong Thi-Phuong; Nguyen, Khoa Dang; Lin, Yu-Min; Hong, Guang; Hsu, Ming-Lun; Wang, Ding-Han. Comparison of stereolithography (STL) and polygon file format (PLY) for intraoral scans: From chairside to archive // Journal of Dentistry 165(2026). (doi: 10.1016/j.jdent.2025.106253)

Research conducted using equipment from the project: "***Analysis of Surface Parameters of Metal Coatings Applied to Polymer Products Manufactured by Additive Technology Using Computer Vision***" (APPMPPTRV) – NPOO2024-2

Sizing crane runway beams for minimum weight

S. Fenyvesi[1], F. Orbán[1, *]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs, Hungary

[*] Corresponding Author. E-mail: orban.ferenc@mik.pte.hu

Abstract
Top running crane runway systems are used for top running single girder cranes along with top running double girder cranes.
This runway style typically uses a square bar that is affixed to the top of a structural beam as a running surface for the top running crane. There are multiple support options for top running crane runway systems. The most common support methods are support from a haunch (attached to the side of a building column) and the use of a freestanding structure.
Runways are parallel beams or rails, typically mounted to the building structure, on which the bridge travels along the length of the work area.
The design of runway beams requires a custom design ,because it depends on the building structure, especially the distances between the columns.
The design of steel crane runway supports is addressed in EC3 - ENV 1993-6. Crane runways are subjected to moving loads. After determining the design loads, the cross-section of the support is designed for two-way bending, and it is also checked for buckling and deformation. The calculations were performed using data from a two-girder crane. The crane has a capacity of 20 tons and the span between supports is 10 meters. The additional data come from an earlier bridge crane design. The search for the minimum weight was performed using MATLAB.

Keywords: Crane runway, moving loads, buckling, vertical deflection, weight calculation

1. Introduction

An overhead crane is a fixed-track lifting machine used in factories and warehouses to move heavy loads. Overhead cranes are commercially available in various sizes and load capacities. The design of crane tracks is unique because they must be adapted to the layout of the building. Building columns are most commonly used as support for crane tracks, but they can also be freestanding structures. The crane track support is a specialized structure in many aspects. The components of the overhead crane moving along it move in multiple directions, thereby transmitting vertical and bidirectional horizontal (longitudinal and transverse) forces to the crane runway support. The design of steel crane runways is governed by the EC3-ENV 1993-6 standard [1].

Load types: the crane's dead weight, the lifted load, forces resulting from the acceleration of the crane bridge and crane trolley, tension forces, and end-of-travel forces. Most of the loads must be determined based on the manufacturer's specifications. The internal forces caused by moving loads can be calculated using the influence lines (Figure 1).

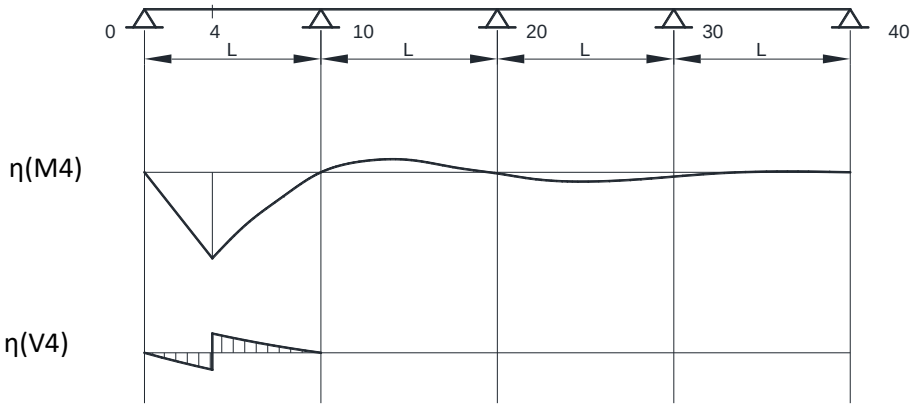
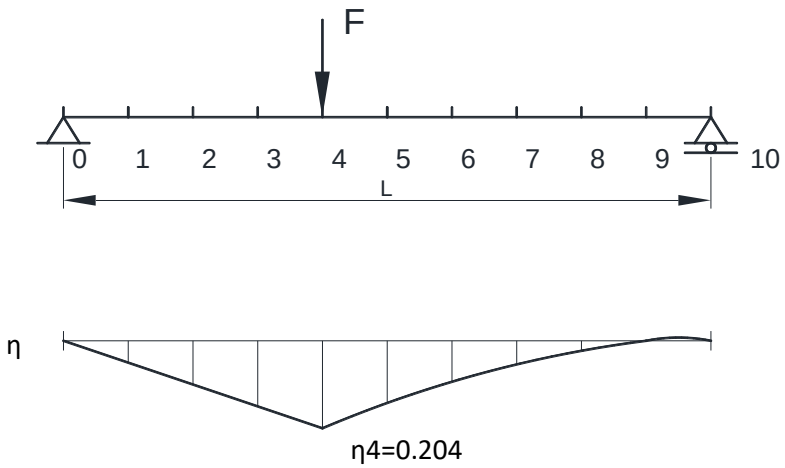


Figure 1. The effects of a moving load for a four-span beam

Bending moment values for a 1 kN moving load as shown in Figure 2.



η	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M4/L [kN]	0.0494	0.0994	0.1507	0.204	0.1598	0.1189	0.0817	0.0491	0.0217	0
V_4 [kN]	0.1	0.2	0.3	0.4 0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0

Figure 2. The influence line ordinates

2. Design of runway beam

The general geometric arrangement of the crane runway beam are illustrated in Figure 3. The diagram shows the main structural layout, including the span length, the arrangement of the supports, and the application points of the moving crane loads used in the optimization model.

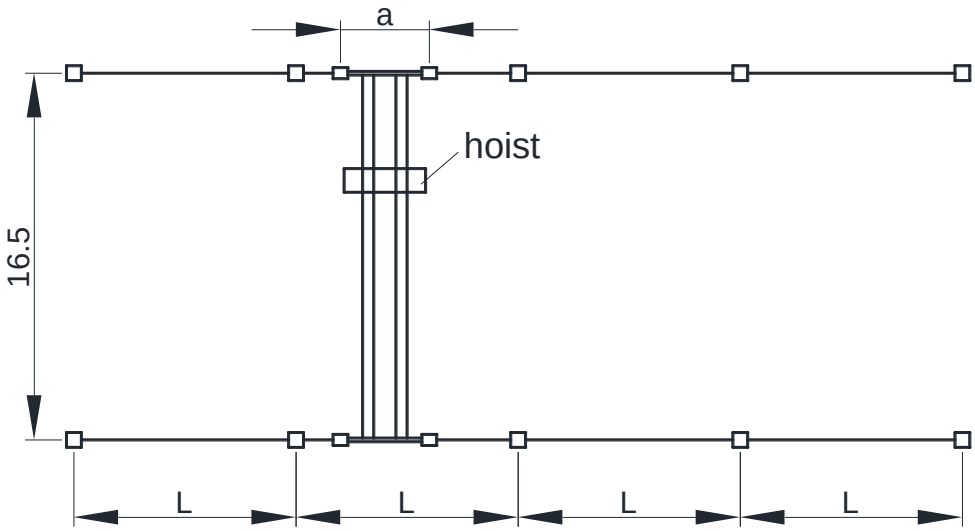


Figure 3. Crane layout

2.1 Bending

The runway beam cross section Figure 4.

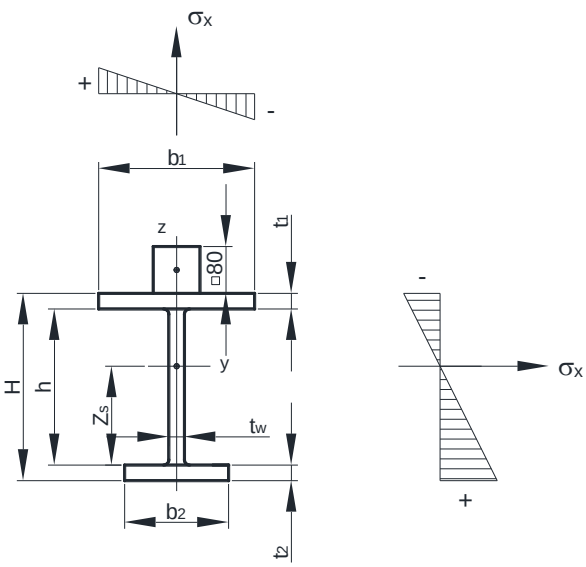


Figure 4. Cross section of the beam and stresses

Stress due to vertical and horizontal loading:

$$\sigma_x = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} + \frac{M_{Ed,z}}{W_{zf}}$$

where W_y is the section modulus

$$W_{zf} = \frac{b_1^2 \cdot t_1}{6}$$

My is the bending moment due to vertical loading

$$M_y = K(\eta_4 + \eta_{4+a}) + \frac{A\rho g L}{12.5}$$

A transverse force equal to 10% of the vertical wheel force is permitted

$$M_z = 0.1K(\eta_4 + \eta_{4+a})$$

2.2 Stress from wheel load
Compressive stress from wheel load:

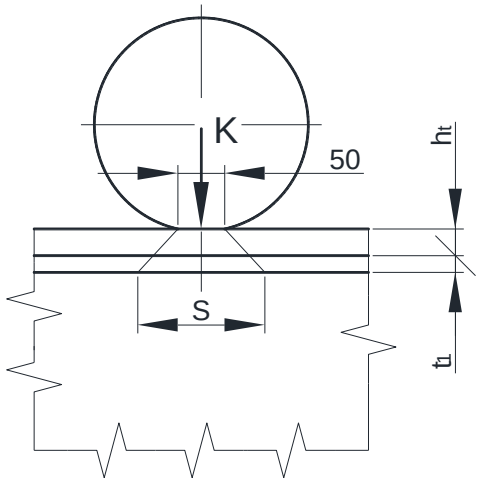


Figure 5. The distribution of the wheel load in the web

$$s = 50 + 2(h_r + t_1)$$

$$\sigma_n = \frac{K}{s\, t_w}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_n^2 - \sigma_x\, \sigma_n + 3\tau^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

2.3 Local buckling under the wheel

The design resistance to local buckling under transverse forces:

$$F_{rd} = \frac{f_{yw}\, L_{eff}\, t_w}{\gamma_{M1}}$$

where

t_w is the thickness of the web,
f_{yw} is the yield stress of the web,
L_{eff} is the effective length,
b is the distance between diaphragms.

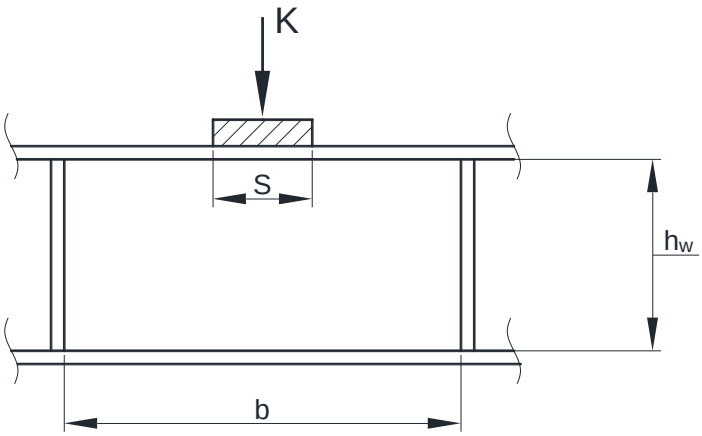


Figure 6. Load application

Buckling coefficient:

$$k_f = 6 + 2\left(\frac{h_w}{b}\right)^2$$

$$L_{eff} = \chi_f\, l_y$$

where

l_y – is the effective loaded length

$$l_y = s + 2\, t_f\left(1 + \sqrt{m_1 + m_2}\right)$$

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w}$$

$$m_2 = 0.02\left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 \quad \text{if} \quad \lambda_F > 0.5$$

$$m_2 = 0 \quad if \quad \lambda_F \leq 0.5$$

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{l_y\, t_w\, f_y}{F_{cr}}}$$

$$F_{cr} = 0.9\, k_f\, E\, \frac{t_w^3}{h_w}$$

The reduction factor χ_F should be obtained from:

$$\chi_F = \frac{0.5}{\lambda_F}$$

2.4 Runway deflection [2]

The vertical deflection was calculated as follows

$$z_{max} = \frac{K\, L^3 \left[3\left(\frac{a+c}{L}\right) - 4\left(\frac{a^3+c^3}{L^3}\right)\right]}{48\, E\, I_y}$$

Permitted deflection: L/600 (according to EN 1993-6:2007)

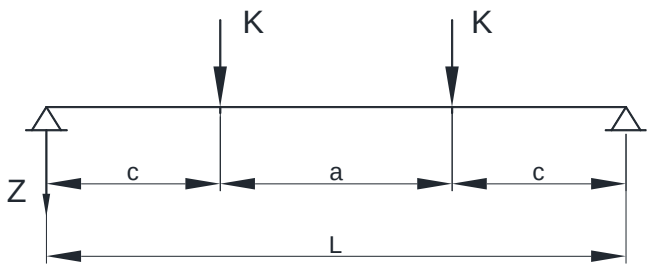


Figure 7. Load positions causing maximum vertical deflection

Deflection due to self-weight:

$$z_k = 6.77 \cdot 10^{-3} \frac{p\, L^4}{E\, I_y}$$

where

$$p = A\, \rho\, g$$

2.5 Simplified stability analysis (Figure 8)

$$L_c max = \lambda_{c0} \frac{M_{c,Ed}}{M_{y,Ed}} \frac{i_{f2}\,\lambda_1}{k_c}$$

$$A_f = b_1\, t_1 + \frac{h\, t_w}{6}$$

$$I_f = \frac{t_1\, b_1^3}{12} + \frac{h\, t_w^3}{72}$$

$$i_f = \sqrt{\frac{I_f}{A_f}}$$

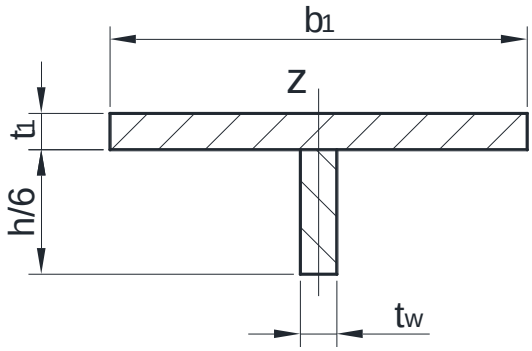


Figure 8. Cross-section of the flange

2.6 Web buckling resistance

$$R_{a,rd} = 0.5\, t_w^2 \sqrt{E\, f_y} \left[\left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{0.5} + 3\left(\frac{t_w}{t_f}\right)\left(\frac{s}{h}\right) \right] \frac{1}{\gamma_{M1}}$$

The interaction between the transverse force and the bending moments was checked.

$$\frac{V_k}{R_{a,rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1.5$$

3. Data for the design

We used the specifications of a previously designed crane for the crane runway design [3]. The hook load is P = 200 kN, and the wheel load is K = 183.1 kN, wheel centers in the carriages a= 4 m, the span of the crane girder is L= 10 m, square bar h_r= 80 mm. Earlier investigations [4] have shown that using steel with a yield strength of 355 MPa instead of 235 MPa yields only minor material savings for heavily loaded cranes, and, under stricter deflection requirements, even these savings diminish. We chose f_y= 235 MPa; E= 210 GPa

4. Optimum calculation

The objective function:

$$W = A\,L\,\rho\,g$$

The number of the unknowns is six (b_1, t_1, b_2, t_2, H, t_w).

Constraints

$$\sum_{i=1}^{6} g_i \geq 0$$

$$g_1 = \frac{f_y}{1.1} - \sigma_x$$

$$g_2 = F_{rd} - K$$

$$g_3 = L_c max - L$$

$$g_4 = \frac{L}{600} - z_k$$

$$g_5 = R_{a,rd} - V_k$$

$$g_6 = 1.5 - \frac{V_{Ed}}{R_{a,rd}} - \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

The optimization was performed using the *fmincon* method in the MATLAB Optimization Toolbox. We rounded the results and performed comparative calculations in the vicinity of the optimum in Table 1.

Table 1. Comparison of sections for crane runway beam design

Parameter	HEB 650	700	750	800	850	900	950
b_1 [mm]	300	340	330	335	330	340	325
b_2 [mm]	300	255	231	240	200	100	100
t_1 [mm]	31	24	22	20	20	20	20
t_2 [mm]	31	18	14	12	12	10	10
t_w [mm]	16	14	14	12	12	12	12
g_1 [MPa]	34.16	28.9	10.06	1.75	1.3	9.3	0.666
g_4 [mm]	2.64	0.091	0.002	0.75	1.9	0.95	2.72
F_{Rd} [kN]	2030	1412.7	1331.6	944.3	923.6	909	890
$L_c$max [mm]	13020	14853	13418	13468	13601	13844	13527
Ra,rd [kN]	1895.7	1373.8	1330.6	949.3	931.2	914.6	900
A [mm^2]	28008	21962	20490	18796	18816	18240	18540
W [kN]	21.56	16.9	15.78	14.47	14.49	14.046	14.277

Among the criteria, only g1 (MPa) or g4 (mm) became active, so the corresponding deviations are reported. The other criteria are satisfied.
The lowest weight values were observed at support heights of H = 900, but the minimum values in the other cases are not much higher.
We verified the results using a finite element program and found good agreement for both deflection and maximum stress.

5. Conclusions

This article presents the main considerations in crane runway design, including strength verification, buckling analysis, flange stiffness, and deformation analysis. Designers typically choose an HEB section for the crane runway cross-section, but this is not cost-effective. An asymmetric I-section is preferable. We analyzed the runway beam section between two supports for minimum weight, which in this case corresponds to the minimum cross-sectional area. The optimization was performed using MATLAB. The data for the example were selected from a previous bridge crane design. According to Table 1, the stress and deformation criteria were active.

6. References

[1] Eurocode 3: EN 1993-1-5:2006. Design of Steel Structures. (standard)

[2] Chaiyoot, M.; Suppachai, C.; Prawit, T. Design Analysis of Overhead Crane for Maintenance Workshop // MATEC Web of Conferences, 207 (2018) ICMMPM 2018. (conference paper)

[3] Farkas, J.; Jármai, K. Szekrényszelvényű futódarúhíd tervezése költségminimumra // Fémszerkezetek innovatív tervezése. 29. fejezet, 2015. (book/chapter in book)

[4] Farkas, J. Economy of Higher-Strength Steels in Overhead Travelling Cranes with Double-Box Girders // Journal of Constructional Steel Research, 6(4) (1986), 285–301. (journal article)

Cost Modelling of Cold Metal Transfer Wire Arc Additive Manufacturing of Aluminium Components

G. F. Vasvári[1,2*], D. Csonka[1], I. Samardžić[2], J. Stojšić[2]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs, Hungary
[2]University of Slavonski Brod, Croatia

[*]Corresponding Author. E-mail: vasvari.gyula@mik.pte.hu

Abstract
Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) based on Cold Metal Transfer (CMT) produces large aluminium parts at roughly one-tenth of the equipment and material cost of powder-bed processes, making it attractive for fabricating and repairing tank fittings, flanges and pipe elements in gas, heat and water infrastructure. Although several AM cost models exist, the mature cost optimisation framework developed for welded steel structures has yet to be transferred to WAAM, despite CMT deposition being a form of arc welding. This study adapts Jármai's fabrication cost formulation to CMT-WAAM by re-deriving its time elements for layer-by-layer deposition. A deposition coefficient specific to CMT is introduced and calibrated for AlMg4.5Mn0.7 wire, at 83 min/kg nominally and 67 min/kg empirically; the blended fabrication rate is disaggregated into machine, machining and labour components; and post-processing time is linked explicitly to measured wall waviness, making the inter-layer dwell time a process decision variable. Applied to a previously manufactured thin-wall specimen, the model gives a component cost of € 4.82 against € 11.55 from single-rate accounting. A sensitivity analysis shows that doubling the as-deposited wall waviness raises the component cost by 20 %, identifying the waviness function as the priority for further experimental work.

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM, Cold Metal Transfer, CMT, cost modelling, aluminium components, welded structure optimisation

1. Introduction

Aluminium components such as flanges, pipe fittings, tank nozzles and valve bodies are widely used in natural gas, district heating and water infrastructure. For small production runs, custom geometries or in-service repairs, additive manufacturing (AM) is becoming an increasingly relevant alternative to casting and machining. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is particularly well suited to this application: it deposits material one to two orders of magnitude faster than powder-bed processes, requires equipment costing a fraction of laser or electron-beam systems, and uses standard welding wires [1, 2]. Cold Metal Transfer (CMT), a controlled short-circuiting variant of gas-metal arc welding developed by Fronius

[3], has emerged as a preferred WAAM heat source for aluminium due to its low and stable heat input, low spatter and good arc stability on thin sections [4, 5].
The economic case for WAAM, however, depends not on the deposition step alone but on the entire process chain, including substrate preparation, inter-layer thermal management, distortion control and — crucially — post-deposition machining to the required final tolerances [6]. Existing AM cost models, most notably the categorisation of Gibson et al. into machine, material, operation and labour costs [7] and the models surveyed in [8], capture this only at a coarse level: they aggregate fabrication into a single operation and therefore offer little purchase on process variables. The welded steel structure community, by contrast, has long used a far more granular approach. Jármai and Farkas [10–12] decompose total cost into a material term and a sum of process-resolved time elements — assembly, welding, additional welding activities, plate straightening, surface preparation, painting, cutting and edge grinding — each estimated from technology-specific empirical functions and weighted by the labour-to-material cost ratio k_f/k_m. The framework has been applied to stiffened plates, columns, beams and storage tanks [9].
Although CMT-WAAM deposition is physically an arc-welding process, using the same heat source, consumable and metallurgy as gas-metal arc welding, this framework has not, to the authors' knowledge, been transferred to wire-arc AM. The present study adapts it to CMT-WAAM by replacing joint-welding time with a deposition term based on deposited mass, separating machine, machining and labour rates, and relating the required machining allowance to the measured wall waviness of deposited aluminium specimens.

2. Methodology

2.1. The classical welded-structure cost model

Jármai [10, 11, 12] expresses the total fabrication cost K of a welded structure as the sum of a material cost K_m and a fabrication cost K_f:

$$K = K_m + K_f = k_m \rho V + k_f \sum_i T_i \tag{1}$$

Where k_m and k_f are the cost factors specific to the material and fabrication, respectively, and ρ is the density and V is the volume. T_i represents the time elements for the individual fabrication operations: T_1: assembly; T_2: welding; T_3: additional welding activities; T_4: plate straightening; T_5: surface preparation; T_6: painting; and T_7: cutting and edge grinding. The ratio k_f/k_m characterises the labour-to-material cost balance of the manufacturing environment.

2.2. Mapping the elements to wire-arc additive manufacturing

As CMT-WAAM is an arc-welding process itself, every element of Jármai's framework has a natural counterpart in WAAM. This mapping is summarised in Table 1.

Table 1. Mapping of the Jármai cost-time elements to CMT-WAAM.

Time element	Welded-structure operation (Jármai)	CMT-WAAM counterpart
T_1	Component assembly and tack welding	Substrate plate preparation and clamping
T_2	Welding (deposition of joint material)	Layer-by-layer wire deposition - the principal WAAM time
T_3	Electrode change, slag removal, deslagging	Wire-spool change, inter-layer cleaning and inter-layer dwell for heat dissipation
T_4	Plate straightening after distortion	Distortion correction and residual-stress relief
T_5	Surface preparation (cleaning, sandblasting)	Substrate cleaning and final-surface preparation
T_6	Painting	Coating (usually not applied for aluminium AM parts)
T_7	Cutting and edge grinding	Post-deposition CNC machining to final tolerance - a dominant term in WAAM

Two consequences of this mapping are particularly noteworthy. Firstly, T_2 - the welding time, which was the dominant fabrication time in Jármai's original formulation — now represents the deposition time of the entire part rather than the time taken to lay a joint weld. Consequently, its scaling changes from weld length and cross-section to deposited volume and deposition rate. Secondly, T_7 - the time taken for cutting and edge grinding, which is a relatively minor factor for conventional welded assemblies — becomes a significant cost driver for WAAM. This is because the deposited surface waviness must be removed by machining in order to achieve the required dimensional tolerance.

2.3. Modified cost function

With the mapping of Table 1, the total manufacturing cost of a CMT-WAAM component is expressed as

$$K_{\mathrm{AM}} = k_m \rho V_{\mathrm{dep}} + k_M \left(T_{\mathrm{dep}} + T_{\mathrm{dwell}}\right) + k_C T_{\mathrm{post}} + k_L T_{\mathrm{setup}} \qquad (2)$$

in which the original blended fabrication rate k_f is split, following the multi-rate convention of Gibson et al. [7] adopted in the authors' previous work [13], into three distinct rates: k_M for unattended machine-deposition time (amortisation, overhead, energy, shielding gas), k_C for CNC machining time, and k_L for the operator-attended labour time. This separation matters for WAAM because the deposition step itself is largely unattended once the build is started, so charging the full labour rate over the full build time - as a single-rate formulation would do - substantially overestimates labour cost.

For direct comparability with Jármai's original formulation a single-blended-rate form is also retained:

$$\frac{K_{\mathrm{AM}}}{k_m} = \rho V_{\mathrm{dep}} + \frac{k_f}{k_m}\left(T_{\mathrm{setup}} + T_{\mathrm{dep}} + T_{\mathrm{dwell}} + T_{\mathrm{post}}\right) \qquad (3)$$

2.4. Cost terms

The volume of the deposited material includes the near-net oversize required for finish machining.

$$V_{\text{dep}} = V_{\text{net}} + A_m \delta \tag{4}$$

where V_{net} is the finished part volume, A_m is the total surface area to be machined, and δ is the machining allowance per surface.

The deposition time is the analogue of Jármai's welding time, expressed through a CMT-specific specific-deposition-time constant C_{AM}:

$$T_{\text{dep}} = C_{\text{AM}} \rho V_{\text{dep}} = \frac{m_{\text{dep}}}{\dot{m}}, \quad C_{\text{AM}} = \frac{1}{\dot{m}}, \quad \dot{m} = \rho_w \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) v_w \tag{5}$$

Here ṁ is the mass-deposition rate, d the wire diameter, vw the wire-feed speed and ρ_w the wire density. The coefficient C_{AM} plays the role of Jármai's welding-time constant C_2 but is calibrated for the entire deposition step rather than for an individual weld pass.

The inter-layer dwell time, introduced to limit heat accumulation between layers, contributes

$$T_{\text{dwell}} = n_L t_d \tag{6}$$

where n_L is the number of deposited layers and t_d the dwell time per layer.

The post-processing time is the volume of material to be removed by finish machining divided by the material-removal rate:

$$T_{\text{post}} = \frac{A_m \delta}{Q_m} \tag{7}$$

with Q_m the volumetric material-removal rate of the finishing operation.

2.5. The geometric-instability cost chain

In this formulation, the key coupling that links process physics to economics is the requirement for the machining allowance to cover both the as-deposited wall waviness (Δ) and a finishing tolerance.

$$\delta \geq \Delta(t_d, v) + \delta_{\text{tol}} \tag{8}$$

Since Δ depends on the thermal history of the build, particularly the inter-layer dwell strategy and deposition speed (v), equation (8) forms a chain through which geometric instability propagates directly into total cost. The proposed model links wall waviness to machining allowance and post-processing cost. Quantitative optimisation requires further calibration of the $\Delta(t_d,v)$ function and of the build-failure probability.

$$\Delta \uparrow \Rightarrow \delta \uparrow \Rightarrow T_{\text{post}} \uparrow \Rightarrow K_{\text{AM}} \uparrow \tag{9}$$

A second cost channel exists in parallel: when the heat-accumulation limit is exceeded the deposited wall collapses and the build fails, generating a scrap cost. In the experimental data used here this manifested as collapsed specimens at insufficient dwell, length and speed combinations [13]. The probability of this failure mode is also a decreasing function of t_d.

2.6. Optimisation formulation

The above relationships make t_d a genuine decision variable rather than a passive parameter. Increasing t_d raises T_{dwell} and hence the deposition-side cost, but reduces Δ and the scrap probability, lowering T_{post} and yield-related cost. The economic optimum is the value of t_d at which these two opposing effects balance. The corresponding optimisation problem is

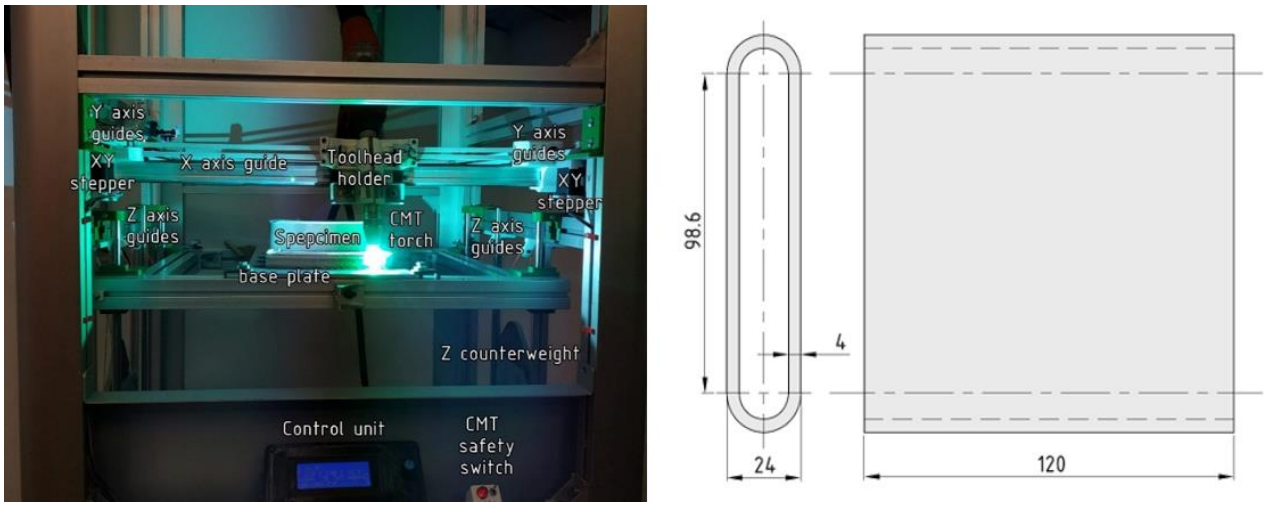
$$\begin{aligned} &\text{minimise} && (K_{\mathrm{AM}}) \\ &\text{over} && (t_d, ; v, ; \delta_{\mathrm{tol}}) \\ &\text{subject to} && \left(t_d \geq t_{d,\min}\right) && \text{(thermal stability)} \\ & && (\delta \geq \Delta(t_d, v) + \delta_{\mathrm{tol}}) && \text{(waviness coverage)} \\ & && \left(t_{\mathrm{net}} = t_{\mathrm{dep}} - 2\delta \geq t_{\mathrm{req}}\right) && \text{(final dimension)} \\ & && \left(R_m \geq R_{m,\mathrm{req}}\right) && \text{(strength)} \end{aligned} \tag{10}$$

The thermal-stability constraint sets a lower bound on dwell below which heat accumulation drives build failure. The waviness-coverage constraint enforces (8). The dimensional constraint requires that, after removing 2δ of stock from a deposited wall of thickness t_{dep}, the finished wall thickness t_{net} satisfies the design requirement. The strength constraint is in practice non-binding for CMT-deposited AlMg4.5Mn0.7, whose tensile strength remains close to that of the base material [13].

3. Experimental basis and model calibration

3.1. CMT-WAAM specimen data

The calibration data used in this paper are taken from the authors' previous experimental study on CMT-based wire-arc deposition of aluminium [13]. Figure 1. shows the custom-built CoreXY-kinematics WAAM machine which was used to deposit thin-wall closed-loop specimens of AlMg4.5Mn0.7 (EN-AW5083) using a 1.2 mm wire on a 5 mm aluminium base plate, with argon shielding at 15 l/min. Stable deposition was obtained with torch-travel speeds in the range 65 to 75 mm/s and a steady-state wire-feed speed of v_w = 4.0 m/min for layers 5 onwards. Above 60 mm build height the seam-width fluctuation stabilised, indicating a balance between heat input and dissipation. The tensile strength of the deposited material ranged between 243 and 270 MPa, against 275 MPa for the wrought base material — a reduction of 1.8 to 11.6 %.



(**a**) (**b**)

Figure 1. Experimental basis of the reference cost model: (a) custom-built CoreXY CMT-WAAM equipment; (b) CMT-WAAM loop specimen [13]

3.2. Calibration of the deposition coefficient

With d = 1.2 mm, v_w = 4.0 m/min and ρ_w = 2660 kg/m³, equation (5) gives a nominal mass-deposition rate of

$$\dot{m} = 2660 \cdot \left(\frac{\pi \times 1.2^2}{4}\right) \cdot \left(\frac{4.0 \times 10^3}{60}\right) \cdot 10^{-9}\,\mathrm{kg/s} \approx 2.0 \times 10^{-4}\,\mathrm{kg/s} \approx 0.72\,\mathrm{kg/h} \tag{11}$$

and therefore C_{AM} = 1 / ṁ ≈ 83 min/kg.

This nominal value can be cross-checked against the measured build time of the reference specimen. A closed-loop wall with a perimeter of 260 mm and 300 layers, with an approximate weight of 0.48 kg, was deposited in T_b = 0.54 h. This gives an effective deposition rate of 0.48 / 0.54 ≈ 0.89 kg/h, and an empirical C_{AM} of approximately 67 min/kg. The empirical deposition rate exceeds the nominal one by approximately 23 %. Part of this is attributable to the elevated wire-feed speeds (5.2–7.6 m/min) applied in the first four layers to establish the bond to the substrate [13], but these represent only about 1 % of the 300 deposited layers and therefore account for a minor share of the difference. The remainder is attributed to two sources of uncertainty in the reference data: the deposited mass of the specimen, which was derived from the nominal build geometry rather than by weighing, and the relationship between the set wire-feed speed and the net feed actually delivered by the oscillating CMT wire drive. For cost estimation the empirical value is therefore preferred, and the nominal value derived from equation (5) should be regarded as a lower-bound estimate of the deposition rate.

3.3. Wall waviness and the waviness function

The dimensional measurements reported in [13] showed that the standard deviation of the seam width stabilises above a build height of approximately 60 mm and depends on the speed-length combination of the layer pattern. For the stable parameter sets (sets 1, 2, 4 and 5 in Table 3 of [13]), the peak-to-mean seam width amplitude in the stabilised region was approximately 0.4–0.7 mm. For combinations with insufficient cooling (sets 3, 6, and 7–9), the wall collapsed entirely. The waviness function $\Delta(t_d, v)$ is taken as a monotonically decreasing function of the effective inter-layer cooling in what follows, with an asymptote of approximately 0.5 mm under the stable operating window. Section 5 identifies a full empirical fit of $\Delta(t_d, v)$ on a richer experimental matrix as future work.

4. Case study: cost of thin-wall aluminium component

4.1. Component definition

The 260 mm perimeter closed-loop aluminium thin-wall specimen of [13] is taken as a representative near-net blank for a thin-walled tank or pipe component intended for use with gas, heat or water. The final product requires a specific finished wall thickness and a clean machined surface on the inside and outside of the wall. The deposited blank has a mass of approximately 0.48 kg, a total machinable surface area of approximately 6.2×10^4 mm² (inside and outside combined) and is produced in 0.54 hours on the CMT-WAAM machine described in [13]. The waviness in the stabilised region is taken as $\Delta \approx 0.5$ mm, and the finishing tolerance is taken as $\delta_{(tol)} = 0.1$ mm. This gives a per-surface machining allowance of $\delta = 0.6$ mm. The material-removal rate for finish milling aluminium is $Q_m = 8 \times 10^3$ mm³/min.

4.2. Cost breakdown using the modified model

Using the cost rates of [13] - €4/kg for AlMg wire, a machine-time rate of €0.94/h derived from CMT-WAAM equipment amortisation and overheads, a labour rate of €15/h and an assumed CNC machining rate of €15/h - and the calibrated parameters of Section 3, the cost of each element of equation (2) is calculated in Table 2.

Table 2. Cost-element breakdown for a 260 mm thin-wall CMT-WAAM aluminium component using the modified model (equation 2).

Element	Formula	Time / Quantity	Cost (€)
Material	$k_m \rho V_{dep}$	0.48 kg	1.92
Setup (operator)	$k_L T_{setup}$	5 min	1.25
Deposition (unattended)	$k_M T_{dep}$	32 min	0.50
Inter-layer dwell	$k_M T_{dwell}$	0 min*	0.00
Post-machining	$k_C T_{post}$	4.6 min	1.15
Total (K_{AM})			4.82

* Continuous closed-loop deposition; based on the authors' prior experience, the loop circumference itself provides sufficient cooling between layers.

4.3. Comparison with the single-rate (Gibson-style) accounting

In the authors' previous accounting of the same specimen using the Gibson-style four-category cost model, the total was reported as 11.55 € [13], dominated by a labour cost of 9.11 € which charged the full operator rate over the entire build time. The modified model of equation (2), evaluated above, gives 4.82 € - a 58 % reduction. The reduction comes almost entirely from the labour term: by recognising that 32 of the 41 fabrication minutes are unattended deposition charged at the machine rate k_M, rather than at the operator rate k_L, the model assigns labour cost only to the genuinely attended setup and machining steps. This is a more faithful representation of WAAM economics, and the magnitude of the change underlines why disaggregating k_f into deposition-machine, machining and labour components is methodologically necessary for wire-arc AM, even though it was not for the joint-welding tasks Jármai originally formulated.

4.4. Sensitivity to the geometric-instability chain

The post-machining cost depends linearly on the machining allowance (δ) through equation (7), and (δ) is bounded below by the waviness (Δ) through equation (8). For the reference component, doubling the as-deposited waviness from 0.5 mm to 1.0 mm (a plausible deterioration if dwell time is reduced towards the stability limit) increases δ from 0.6 mm to 1.1 mm, T_{post} from 4.6 min to 8.5 min, and the total cost from €4.82 to €5.79. Conversely, reducing Δ slightly by increasing dwell time - for example, setting t_d to 1s per layer and adding $n_L t_d$ to 5 min, which incurs an additional cost of 0.08 € - could be worthwhile if it brings Δ below the dominant component of the allowance, thereby reducing T_{post} by more than 0.5 min. This is the optimum captured by problem (10). A full quantitative determination requires the calibrated $\Delta(t_d, v)$ surface, which is to be identified in future work.

5. Discussion

The contribution of this paper is the adaptation of Jármai's welded-structure cost framework to CMT-WAAM, together with the coupling of wall waviness to machining allowance and post-processing cost through equations (8) and (9), which makes the inter-layer dwell time t_d a process decision variable balancing deposition time, geometric accuracy and scrap risk rather than a fixed parameter. The calibration rests on a single case: closed-loop thin walls of AlMg4.5Mn0.7 deposited with one CMT parameter set on one machine. This demonstrates the structure of the model but not its general applicability, and four directions of validation are required. Geometry: closed-loop walls cool naturally through the loop circumference, so the dwell term vanished in the reference case; open walls, intersecting features and bulk sections will require non-zero dwell and shift the balance of equation (2). Alloy: AlMg4.5Mn0.7 is non-heat-treatable and tolerant of arc deposition; alloys with different solidification ranges may show different waviness behaviour and require re-identification of

Δ. Process parameters: C_{AM} follows from wire diameter and feed speed, so any change to these or to the pulse programme requires recalibration through equation (5). Wall thickness: the reference specimen was a single-bead wall machined on both faces; for multi-bead and thicker walls the ratio A_m/V_{dep} changes, and with it the weight of the post-processing term.
Future work will address the empirical identification of the waviness function $\Delta(t_d, v)$, and will extend the model to other geometries, to hybrid CMT-WAAM and CNC production and repair applications, and to process-resolved comparisons with DMLS and EBM, addressing the wider question of when metal additive manufacturing becomes cost-competitive with conventional processes [14].

6. Conclusions

A cost model has been developed for components produced using CMT-WAAM, based on the classical welded-structure cost-optimisation framework developed by Jármai. As CMT deposition is an arc-welding process itself, the seven Jármai time elements transfer to WAAM with a clear physical interpretation. The model introduces a CMT-specific deposition coefficient, C_{AM}, which is calibrated to approximately 83 min/kg (nominal) and 67 min/kg (empirical) for AlMg4.5Mn0.7 wire. It also disaggregates the original blended fabrication rate into machine, machining, and labour components, providing a more accurate representation of the largely unattended nature of layer-by-layer deposition. When applied to a previously published 260 mm thin-wall aluminium specimen, the modified model yields a total cost of €4.82, as opposed to €11.55 using single-rate accounting. This difference is largely due to the proper attribution of unattended deposition time. A direct coupling is established between as-deposited wall waviness, machining allowance and post-processing cost, making the inter-layer dwell time a genuine decision variable and generating an explicit cost minimisation problem. The framework provides a basis for optimising deposition strategies on a per-component basis, as well as enabling fair cost comparisons between WAAM and competing additive and conventional technologies for aluminium components in natural gas, heat, and water infrastructure.

Acknowledgments

The authors thank the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs, for providing the institutional background and facilities for the research. The authors also acknowledge the support of the doctoral programme of the Faculty of Mechanical Engineering in Slavonski Brod.
During manuscript preparation, Claude (Anthropic, accessed June 2026) was used to assist in drafting and restructuring parts of the text, while DeepL was used for language support and translation. These tools were not used to generate or alter experimental data, numerical results, figures or references. All scientific content, calculations, source verification, interpretations and final text were independently reviewed by the authors, who take full responsibility for the manuscript.

7. References

[1] Williams, S. W.; Martina, F.; Addison, A. C.; Ding, J.; Pardal, G.; Colegrove, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology, 32(2016), 7; 641–647.

[2] Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81(2015); 465–481.

[3] Schierl, A. The CMT process – A revolution in welding technology. Welding in the World, 49(2005), Special Issue; 38–39.

[4] Pickin, C. G.; Young, K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. Science and Technology of Welding and Joining, 11(2006), 5; 583–585.

[5] Selvi, S.; Vishvaksenan, A.; Rajasekar, E. Cold metal transfer (CMT) technology — An overview. Defence Technology, 14(2018), 1; 28–44

[6] Lee, H. K.; Kim, J.; Pyo, C.; Kim, J. Evaluation of bead geometry for aluminum parts fabricated using additive manufacturing-based wire-arc welding. Processes, 8(2020), 10; 1211.

[7] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer, New York, 2010. (ISBN 978-1-4419-1119-3)

[8] Costabile, G.; Fera, M.; Fruggiero, F.; Lambiase, A.; Pham, D. Cost models of additive manufacturing: A literature review. International Journal of Industrial Engineering Computations, 8(2017); 263–282.

[9] Zsebe, T.; Vasvári, Gy.; Orbán, F. Economical design of vertical storage tanks. In: Proceedings of the 21st Natural Gas, Heat and Water Conference / 14th International Natural Gas, Heat and Water Conference, Osijek, 2023.

[10] Jármai, K. Hegesztett szerkezetek költségoptimálása. In: Tartószerkezeti Kutatások — Évfordulós kötet Lenkei Péter tiszteletére, University of Pécs, 2003; 44–52

[11] Farkas, J.; Jármai, K. Analysis and Optimum Design of Metal Structures. A. A. Balkema Publishers, Rotterdam/Brookfield, 1997. (ISBN 90 5410 669 7)

[12] Farkas, J.; Jármai, K. Fabrication cost calculation and optimum design of welded steel silos. Welding in the World, 37(1996), 5; 225–232

[13] Vasvári, G. F.; Csonka, D.; Zsebe, T.; Schiffer, Á.; Samardžić, I.; Told, R.; Péntek, A.; Maróti, P. CMT additive manufacturing parameters defining aluminium alloy object geometry and mechanical properties. Materials, 14(2021), 19; 5784. (ISSN 1996-1944)

[14] Laureijs, R. E.; Roca, J. B.; Narra, S. P.; Montgomery, C.; Beuth, J. L.; Fuchs, E. R. H. Metal additive manufacturing: Cost competitive beyond low volumes. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 139(2017), 8; 081010.

Određivanje materijalnog i ekonomskog potencijala recikličnosti odbačenih žarulja
Determining the material and economic recycling potential of discarded light bulbs

M. Živković[1], G. Rozing[1*], D. Buljić[1], I. Vidaković[2]

[1]Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, 31000 Osijek, Hrvatska
[2]Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilište u Osijeku, Vladimira Preloga 1, 31000 Osijek, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: grozing@ferit.hr

Sažetak
Odbačena rasvjetna tijela predstavljaju značajne ekološke i ekonomske probleme, a njihovo nepravilno odlaganje šteti ne samo ljudskom zdravlju nego i okolišu općenito. Obzirom da se svaka žarulja za obavljanje svoje osnovne funkcije, sastoji od različitih komponenti koje u sebi sadrže opasne i štetne tvari, potrebno je posvetiti dužnu pažnju na njihovo pravilno odlaganje i zbrinjavanje. Nepravilnim odbacivanjem i zbrinjavanjem žarulja dolazi do gubitka važnih materijalnih resursa, a njihovim se recikliranjem svaka komponenta može iskoristi u nove svrhe, a štetni materijali na pravilan način trajno zbrinuti. Zbog svega navedenog raste zabrinutost javnosti i struke u pogledu gospodarenja rasvjetnim tijelima koja su došla do kraja svog životnog vijeka. Stoga je globalna pozornost usmjerena na istraživanje i zakonsku regulativu pravilnog recikliranja i zbrinjavanja odbačenih žarulja. U ovom radu utvrđuje se mogućnost recikliranja na primjeru LED štednih žarulja podvrgavanjem jednostavnom postupku recikliranja. Također je provedeno i vrednovanje njihove recikličnosti primjenom ekonomsko-ekološke analize.

Ključne riječi: odbačene žarulje, pravilno zbrinjavanje, recikličnost, ekonomska dobit.

Abstract
Discarded lighting fixtures pose significant environmental and economic problems, and their improper disposal harms not only human health but also the environment in general. Since every light bulb consists of various components that contain hazardous and harmful substances necessary for its primary function, it is essential to pay due attention to its proper disposal and environmentally responsible waste management. Improper disposal and management of light bulbs lead to the loss of valuable material resources, whereas through recycling, each component can be reused for new purposes and hazardous materials can be permanently disposed of in an appropriate manner.

For all these reasons, concern among both the public and professionals is growing regarding the management of lighting fixtures that have reached the end of their service life. Consequently, global attention is focused on research and legislation concerning the proper recycling and disposal of discarded light bulbs. This paper examines the recyclability of LED energy-saving light bulbs by subjecting them to a simple recycling process. It also evaluates their recyclability using an economic-ecological analysis.

Key words: discarded light bulbs, proper disposal, recyclability, economic benefit.

1. Introduction

The recycling of lighting equipment involves complex processes that include mechanical separation, chemical treatment, and the application of specialized methods for the safe removal of hazardous substances such as mercury, cadmium, and lead, while also recovering valuable raw materials such as glass, metals, and polymers. In addition to conventional fluorescent and other energy-saving lamps, LED lamps are currently the most widely used lighting technology. However, they present new challenges in terms of recyclability due to the presence of electronic components and rare metals. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) is a rapidly growing global environmental issue. Electrical waste contains valuable materials with significant economic value when properly recycled. Unfortunately, only 25% of electrical waste is recycled in formal recycling facilities that provide adequate worker protection [1]. End-of-life lighting equipment is classified as a category of waste electrical and electronic equipment. Like other types of electronic waste, discarded lighting equipment poses both environmental and economic challenges, while its improper disposal and recycling can have harmful effects on human health.

There are many different types of lighting equipment, each operating on different principles and consisting of different components. Many of these components, including phosphors, mercury, various gases, and printed circuit boards, are hazardous to both the environment and human health. Exposure to these substances can cause a variety of health problems. It is important to emphasize that discarded lighting equipment containing heavy metals gradually decomposes, allowing these substances to enter the environment and accumulate in living organisms through the process of bioaccumulation. Improper disposal of heavy metals, polymers, glass, and other materials contained in energy-saving lamps also results in the loss of valuable resources. Through recycling, reusable components can be recovered for new applications, while hazardous materials are safely treated and disposed of in an environmentally responsible manner [2].

In the Republic of Croatia, waste management is regulated by the Waste Management Act (Official Gazette Nos. 84/21 and 142/23). This legislation defines the rules and procedures for waste management and establishes the responsibilities of producers, distributors, and end users. Furthermore, Article 59 of the Act stipulates that at least 80% by mass of collected lighting equipment must be recycled. This requirement represents an important contribution to environmental protection and sustainable development [3].

2. Classification of Energy-Saving Lamps

To better understand the importance of energy-saving lamps in everyday life, it is first necessary to understand why the European Union has completely phased out the use of incandescent lamps. A traditional incandescent lamp consists of a glass bulb filled with a vacuum, nitrogen, or another inert gas and contains a tungsten filament that is heated by an electric current. The very concept of heating indicates inefficient energy utilization, as the objective is not merely to produce light but to generate light that is energy-efficient, economically viable throughout its service life, and environmentally sustainable. Incandescent lamps convert only about 5% of the electrical energy they consume into visible light, while the remaining energy is released as heat [4]. Due to these significant energy losses, the manufacture and sale of incandescent lamps have been banned in the majority of countries. Consequently, various types of energy-saving lamps are now available, with LED lamps being the most widely used.

2.1. LED lamps

Unlike their predecessors, LED lamps emit light when electrons pass through semiconductor materials. They exhibit high energy efficiency because, unlike conventional incandescent lamps, they generate very little energy loss in the form of heat during operation. For this reason, other types of lighting technologies are gradually being phased out. LED lamps also have a longer service life and provide higher-quality illumination. Although their initial purchase price is higher, they are more cost-effective in the long term due to their significantly longer lifespan. Another important advantage is their availability in a wide range of colour temperatures, including warm white, cool white, and even RGB lighting. Owing to these advantages, LED lamps are widely used in households, outdoor lighting, the automotive industry, office and industrial lighting, as well as in electronic devices. A Light Emitting Diode (LED) is a semiconductor diode that converts an electrical signal into optical radiation. It emits electromagnetic radiation based on the principle of electroluminescence, i.e., the spontaneous emission of light caused by the recombination of charge carriers (electrons and holes) [5]. Depending on its intended application, the outer housing of an LED lamp may be manufactured from thermoplastics, ceramics, or aluminium (Figure 1).

Figure 1. Internal structure of LED lamp [6]

A key component of an LED lamp is the semiconductor chip, which consists of multiple semiconductor layers mounted on a substrate made of materials such as sapphire, silicon

carbide, or aluminium nitride. Another essential part of the LED lamp is the optical assembly, comprising a lens, diffuser, and encapsulation. These components are typically manufactured from glass, resin, or silicone. The optical assembly and semiconductor chip are mounted on a printed circuit board (PCB), usually made of aluminium, which contains various electronic components such as resistors, capacitors, and diodes, and provides the electrical power required for the operation of the LED chip.

3. Recyclability Potential of Energy-Saving Lamps

The recyclability of a product depends on several factors, including its structural design, the types of materials used, and the types of joints and connections between components [7]. In this study, a disassembly analysis and recyclability assessment of an energy-saving LED lamp were conducted from the perspectives of technical feasibility, environmental sustainability, and economic viability. The aim of the analysis was to estimate the proportion of materials contained in LED lamps that can be successfully recycled and to evaluate the contribution of the applied manual recycling process to the sustainable management of this type of waste. To determine the recyclability of an end-of-life product, or its potential for material recovery, it is necessary to perform a structural analysis. The first step of the analysis involves disassembling the product into its individual components. Each component is then evaluated using elementary recyclability indicators, including mass, material type, disassembly time, number of components, and recyclability potential. Based on the collected data, composite recyclability indicators are calculated to assess the overall recyclability of the product. In addition to the recyclability assessment, it is essential to evaluate the overall recycling performance, taking into account technical feasibility, economic viability, and environmental benefits. The evaluation considers factors such as the type and quality of materials, the presence of hazardous substances (e.g., mercury), the ease of disassembly and material separation, the cost of recycling in relation to the value of recovered materials, and environmental impacts such as the reduction of CO_2 emissions into the atmosphere.

3.1. Disassembly analysis of an LED Lamp

After determining the basic technical characteristics of the LED lamp, the product was disassembled into its constituent components in order to determine the elementary indicators required for the assessment of its recyclability. Figure 2 shows the analyzed LED lamp manufactured by Tech2lux before disassembly.

Figure 2. Tech2lux LED lamp before disassembly

During the disassembly process, it was important to separate as many individual components as possible using only manual tools and equipment. The following tools were used: combination pliers, a Phillips screwdriver, and a scalpel. The first disassembly operation was performed using a scalpel to separate the diffuser from the lamp housing. After removing the diffuser, it was necessary to detach the threaded metal base and the electrical contact of the LED lamp in order to access the power supply printed circuit board (PCB), as the PCB was connected to the contact terminals. The most time-consuming operation was the separation of the aluminium threaded base from the polymer housing. This procedure required the use of both adjustable pliers and standard combination pliers. After removing the threaded base, the PCB was manually extracted, the electrical wires were cut, and the disassembly process was completed. Figure 3 shows the LED lamp after it had been disassembled into its main components.

Figure 3. LED lamp disassembled into its main components

The LED lamp was separated into the following components: polymer diffuser, LED holder, aluminium threaded base, electrical contact, printed circuit board (PCB), and screws. Table 1 presents the individual disassembly operations and the time required for each step.

Table 1. Disassembly analysis of the LED lamp

Work procedure	Duration of separation	Cumulative duration	Tools
Removing the diffuser	39,93	39,93	Scalpel
Unscrewing the mounting screws	52,80	92,73	Screwdriver
Cutting off the lamp socket	155,61	248,34	Pliers
Disconnecting the power supply	3,13	251,45	By hand
Cutting the wires	3,98	255,43	Pliers

As shown in table 1, the greatest amount of time was required to separate the aluminium threaded base from the polymer housing, a process that could not be completed without the

application of mechanical force. According to table 1, the total disassembly time was 255,43 seconds.

3.2. Recyclability Analysis of the LED Lamp

The recyclability assessment of a product is based on the analysis of the end-of-life product, the determination of elementary recyclability indicators, and the calculation of composite recyclability indicators. Recyclability is expressed as the ratio between the sum of the recyclability values of the individual components and the ideal (maximum) recyclability value. The recyclability of a product depends on several factors, including its structural design, the types of materials used, and the types of joints and connections between components [3]. To determine the recyclability rating of the product, each individual component must first be analysed. Based on the collected data, the overall recyclability indicator is calculated using Equation (3-1) [8]:

$$R = \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot m_i \cdot r_i \cdot \frac{1}{M \cdot r_{max}} \tag{3-1}$$

Where:

- R - product recyclability, b_i - number of occurrences component in the product,
- m_i - mass of the component [kg], r_i - recyclability rating of the component,
- r_{max} - maximum recyclability rating (1 to 5), M - total product mass [kg].

During the analysis, the material type and recyclability rating of each LED lamp component were determined. Subsequently, the mass of each component was measured using a Kern ALS 220-4N analytical balance with a measurement sensitivity of 0,0001 g. The results of the recyclability analysis and the determined elementary recyclability indicators are presented in table 2.

Table 2. Recyclability analysis of the LED lamp

Element name	Material type	Element mass g/piece	Pieces per product	Recyclability rating 0…5	Mass of elements g	Recyclability of elements
		m_i	b_i	r_i	$m_i * b_i$	$m_i * b_i * r_i$
Diffuser	Polycarbonate	8,70	1	5	8,70	43,5
Screw	Steel	0,12	2	5	0,24	1,20
LED holder	Mixed materials	4,45	1	3	4,45	13,35
Threaded	Aluminum	1,25	1	5	1,25	6,25
Contact	Mixed materials	0,88	1	4	0,88	3,52
PCB board	Mixed materials	9,4	1	0	9,40	0

Conductors	Mixed materials	0,07	4	4	0,28	1,12
Housing	Mixed materials	56,6	1	4	56,6	226,40
Total					**81,8**	**295,34**

Based on the data presented in table 2 and using Equation (3-1), the overall recyclability of the LED lamp was calculated.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i \times m_i \times r_i}{M \times r_{max}} = \frac{295{,}34}{409{,}00} = 0{,}72 = 72\ \% \qquad (3\text{-}2)$$

Since the calculated recyclability value is R = 72%, the LED lamp cannot be classified as having favourable recyclability, which requires a recyclability value above 75%. Instead, it falls into the category of products that require selective disassembly in order to achieve efficient material recovery and recycling.

4. Economic and environmental analysis of recyclability

To determine the potential economic benefit of recycling an LED lamp, an economic and environmental analysis was conducted. The analysis included the costs of disassembly, recycling, disposal, and shredding. The total recycling costs were compared with the revenues generated from recycling, after which the overall profit was calculated. This analysis provides a comprehensive assessment of both the environmental and economic impacts associated with the recycling of end-of-life products [8]. According to Equation (4-1), the total recycling costs are calculated as the sum of the disassembly, shredding, recycling, and disposal costs.

$$T = Tra + Tu + Tr + To \qquad (4\text{-}1)$$

Where: *T*ra-disassembly costs, *T*u-shredding costs, *T*r-recycling costs and *T*o-disposal costs.

According to Equation (4-2), the revenue from recycling consists of three different sources of income [4].

$$P = Pr + P\Delta e + PE \qquad (4\text{-}2)$$

Where: *P*r-revenue from the sale of recycled materials, *PΔ*e-evenue generated through energy savings, *P*E-revenue resulting from reduced greenhouse gas emissions.
The profit from recycling, according to Equation (4-3), is calculated as the difference between the total revenues and the total costs [8].

$$DA = (Pr + P\Delta e + PE) - (Tra + Tu + Tr + To) \qquad (4\text{-}3)$$

4.1. Economic and ecological analysis of the LED Lampe

To determine the overall financial outcome of recycling the LED lamp, an economic and ecological analysis was carried out. The analysed costs are presented in tables 3 to 7.

Table 3. Disassembly costs

Work procedure	Separation time
Removing the diffuser	39,93
Removing the LED holder	52,80
Pulling out the lamp socket	155,61
Disconnecting the power supply	3,13
Cutting the wires	3,98
Total disassembly time, t_r, h	0,071
Disassembly cost, c_r, €/h	12,00
Disassembly costs, T_{ra}, €	**0,85**

Table 4. Recycling costs

Material	mass, kg	(c_r), €/kg	(T_r), €
Polycarbonate	0,0087	0,65	0,0056
Steel	0,0024	0,65	0,0016
Aluminum	0,0012	0,65	0,0005
Total mass, m_r, kg	0,0123		
Recycling costs, T_r, €			**0,008**

Table 5. Disposal costs

Waste type/part name	mass, kg	(c_o), €/kg	(T_o), €
Hazardous waste - PCB board	0,0094	0,40	0,0019
Hazardous waste - LED holder	0,0045	0,40	0,0018
Total mass, m_d, kg	0,0139		
Disposal costs, T_d, €			**0,0056**

Table 6. Shredding costs

Mixed materials	mass, kg	c_u, €/kg	T_u, €
Polymer + metal	0,00088	0,50	0,00044
Epoxy resin + Copper	0,00028	0,50	0,00014
Polymer + aluminum alloy	0,056	0,50	0,028
Total mass, m_u, kg	**0,0572**		
Shredding costs, T_u, €			**0,0286**

Table 7. Total recycling costs

Disassembly costs, T_{ra}	0,85
Recycling costs, T_r	0,008
Disposal costs, T_o	0,0056
Shredding costs, T_u	0,0286
Total costs, €	0,8922

Table 8 presents the total revenue generated from recycling the LED lamp, amounting to 0,0488 €. This value is relatively low due to the small quantities of recyclable materials contained in the analysed product.

Table 8. Revenue from recycling

Type of recycled material	Mass of recycled material, kg	Price of recycled materials, C_r, €	Revenue from sales of materials, P_r, €	Energy savings achieved through recycling, Λ e, €/kg	Income from energy savings, $P_{Λe}$, €	Emission reduction, E, kg/kg	Emissions fee, p_E, €/kg	Revenue from emission reductions, P_E, €	**Total income P , €**
1	2	3	4=2x3	5	6=2x5	7	8	9=2x7x8	4+6+9
Polycarbonate	0,0087	0,60	0,0052	0,08	0,000696	3,25	0,8	0,0226	0,0284
Steel	0,0024	0,20	0,0004	0,30	0,00072	4,5	0,8	0,0086	0,0097
Aluminum	0,0012	4,20	0,0050	1,20	0,0014	4,5	0,8	0,0043	0,0107
Total									**0,0488**

The calculated total costs were compared with the total recycling revenues, and the resulting profit was determined using Equation (4-3). Since the total revenue amounted to 0,0488 €, while the total recycling costs reached 0,8922 €, the recycling process resulted in a financial loss of 0,8434 €.

5. Conclusion

Based on the conducted disassembly and recyclability analyses of the selected LED lamp, it can be concluded that the complete disassembly process required slightly more than four minutes. The lamp consisted of a total of 12 components, while only five disassembly operations were required to separate them. The most time-consuming operation was the removal of the aluminium threaded base from the lamp housing. The recyclability analysis confirmed that the selected manual recycling procedure is not suitable, as the calculated recyclability of the LED lamp was 72%. The relatively low recyclability can be attributed to the inability to completely separate all materials within individual assemblies. Another significant limitation is the high proportion of hazardous materials, which have a recyclability rating of 0 and therefore cannot be recycled.

The application of the economic and environmental assessment model revealed a negative financial outcome, indicating that recycling the LED lamp using the analysed manual procedure is not economically viable. The cost analysis showed that disposal costs were the lowest due to the small mass of components requiring disposal. In contrast, the highest costs were associated with the disassembly process, primarily because of its relatively long duration and the high labour costs involved. The total revenue generated from recycling the LED lamp amounted to only 0,0488 €, which is extremely low due to the very small quantity of recyclable materials recovered during the analysis. Another factor contributing to the negative economic result is the large proportion of assemblies composed of different materials that could not be effectively separated.

Current legislation provides guidelines aimed at reducing the environmental impact of waste lighting equipment; however, the effectiveness of these measures depends on their consistent implementation, consumer awareness, and the availability of well-developed collection and recycling infrastructure. Modern recycling technologies, which enable higher material recovery rates and safer removal of hazardous substances, are essential for achieving the principles of a circular economy within the lighting industry. To improve the recyclability of LED lamps, product designers should follow design guidelines that promote the recyclability of electrical and electronic equipment. An efficient approach is to use modular components, which allow for faster disassembly. The study used its own estimates of costs and revenues included in the economic analysis; therefore, a certain degree of uncertainty may have affected the results obtained. Since the manual disassembly method did not result in a positive economic outcome, the disassembly process should be reconsidered. A combination of manual and mechanical disassembly is recommended to increase the speed and efficiency of processing end-of-life LED lamps and to improve the overall economic viability of the recycling process.

6. Literature

[1] D. N. Perkins, M. Drisse, T. Nxele, P. D. Sly, E-Waste: A Global Hazard, Annals of Global Health, Volume 80, Issue 4, (2014), pp 286-295.

[2] Kljajin, Milan; Opalić, Milan; Pintarić, Antun. Recikliranje električnih i elektroničkih proizvoda, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2006.

[3] Zakon.hr, Zakon o gospodarenju otpadom, 2021., https://www.zakon.hr/z/2848/zakon-o-gospodarenju-otpadom, [07.05.2025].

[4] M. Rea, Clinics in Perinatology, Lighting for caregivers in the neonatal intensive care unit, Volume 31, Issue 2, (2004), Pages 229-242.

[5] F. Wang, X. Liu, Feng Gao, Advanced Nanomaterials for Solar Cells and Light Emitting Diodes, Elsevier, 2019.

[6] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LED-E27-Light-Bulb [30.06.2025].

[7] Martens, H., Goldman D.: Recyclingtechnik: Fachbuch fur Lehre und Praxis, Springer, 2016., (ISBN 978-3-658-02785-8).

[8] Pintarić Anttun. Assessment of recyclability for electrical waste, *13th International Symposium on Waste Management*, Zagreb, Hrvatska, 2015.

Development of an ESP32-Based IoT Didactic Power Transmission Rig and Its Application in Laboratory Teaching

T. Solar[1], I. Grgić[1,*], M. Karakašić[1], J. Marijić[1], J.A. Sajid[2], V.K. Tiwary[3]

[1]University of Slavonski Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, Slavonski Brod, Croatia
[2]Department of Aerospace Engineering, Aviation and Aerospace University, Lalmonirhat, Bangladesh
[3]Department of Mechanical Engineering, KLS Gogte Institute of Technology, Belagavi, India

[*]Corresponding author. E-mail: igrgic@unisb.hr

Abstract
This paper presents the design, manufacturing and experimental testing of a didactic power and motion transmission rig equipped with an ESP32-based Internet of Things (IoT) measurement system. The rig consists of a stepper motor, spur and bevel gear stages, a belt transmission, and a lifting drum, with all transmission elements dimensioned using standard engineering procedures and manufactured by additive technology (3D printing). An IoT monitoring system comprising an ESP32 microcontroller, a load cell with HX711 signal conditioning, and photoelectric speed sensors enables real-time acquisition of shaft speeds and drum load. For a theoretical shaft speed of 106.6 rpm, the motor-side and intermediate-shaft speed sensors remained within approximately 4–15% of the calculated values, while the drum-shaft sensor showed a larger, systematic offset attributed to an encoder-configuration mismatch, addressed here as a calibration limitation. Load cell readings for nominal 2 kg and 4 kg drum loads closely matched expected masses, with deviations below 3%, while no-load readings remained close to zero with only minor sensor offset. The results confirm the suitability of the developed platform for laboratory teaching and introductory IoT-based machine monitoring.

Key words: IoT; Power Transmission; Didactic Rig; Speed Measurement; 3D Printing.

1. Introduction

Mechanical power and motion transmission systems represent fundamental components of modern machinery, responsible for transferring mechanical energy from prime movers to working machines across a wide range of industrial and educational applications. Gear pairs and shaft assemblies form the kinematic chain through which rotational speed, torque, and power flow are defined and controlled [1, 2]. Standard engineering design procedures require the precise determination of gear geometry, tooth load-carrying capacity, shaft dimensioning, and bearing selection to ensure reliable operation under prescribed loading

conditions [3, 4]. In the context of educational prototypes, such calculations are particularly valuable as they bridge theoretical mechanics with practical mechanical design, offering students direct insight into the interaction between kinematic parameters and structural integrity [5, 6]. In the context of the Fourth Industrial Revolution commonly referred to as Industry 4.0, the integration of advanced technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and big data analytics is transforming how manufacturing systems are designed, operated, and monitored. Empirical evidence shows that organisations adopting IoT and Industry 4.0 technologies in their operational processes achieve measurable improvements in product quality, operational efficiency, and customer satisfaction, which in turn positively influence market competitiveness and long-term business sustainability [7]. This shift necessitates that engineering education keep pace with industry expectations, equipping students with both the theoretical foundations and practical skills to implement cyber-physical monitoring systems on real mechanical equipment [8]. Cyber-physical systems (CPS) represent the convergence of computational intelligence with physical processes through the continuous and iterative exchange of information between a physical sphere where sensors record the state of the system and a cyber sphere, where the acquired data is evaluated and acted upon through actuators or control logic. This paradigm enables real-time monitoring, predictive maintenance, and process optimisation across the entire product lifecycle, fundamentally transforming how mechanical systems are designed, operated, and maintained [9]. The pedagogical value of implementing such systems on physical prototypes has been recognised in the literature. Ahmad et al. [8] emphasise that teaching CPS in engineering curricula requires hands-on prototyping environments where students can observe and validate the interaction between mechanical systems and their digital counterparts. The Internet of Things is a core enabling technology of the CPS paradigm. An IoT system is defined as a network of interconnected devices that autonomously send, receive, and exchange data over a wireless or wired network, integrating physical sensors, actuators, microcontrollers, communication modules, and cloud services into a unified, interactive system. In manufacturing and mechatronics education, IoT-based measurement platforms built around low-cost microcontrollers such as the ESP32 have demonstrated their effectiveness as flexible, affordable tools for teaching and validating physical system behaviour. The ESP32, developed by Espressif Systems, offers a dual-core processor, integrated Wi-Fi and Bluetooth connectivity, a large number of general-purpose I/O pins, and low power consumption, making it particularly well-suited for embedded and IoT applications [10]. Ryalat et al. [11] further highlight the integration of advanced mechatronic systems into Industry 4.0 frameworks as a key driver for sustainable manufacturing, and outline the role of affordable, modular sensor platforms in enabling this integration at the laboratory and small-scale prototype level. Load cells combined with the HX711 signal-conditioning module and photoelectric rotational speed sensors are among the most commonly employed sensing elements in low-cost mechatronic monitoring systems. The HX711 module amplifies the millivolt-range differential output of the Wheatstone bridge within the load cell and performs a 24-bit analogue-to-digital conversion, delivering a clean digital signal to the microcontroller [10]. Koene et al. [12] demonstrated the effectiveness of this approach in an open-hardware IoT vibration and force measurement

system, showing that consumer-grade sensor components, when properly integrated, can achieve measurement performance appropriate for educational and light industrial monitoring applications. This paper presents the design, implementation, and experimental validation of an ESP32-based IoT measurement system integrated into a didactic power and motion transmission prototype. The mechanical system comprises a stepper motor drive, spur and bevel gear stages dimensioned according to standard procedures for polymer gears [4, 5], a belt transmission, and a lifting drum, with shaft design and bearing selection performed following established references [3, 6]. The IoT layer adds real-time monitoring of shaft rotational speeds on three shafts and load cell measurements under static and dynamic conditions for nominal test loads of 2 kg and 4 kg. The objective is to demonstrate that a low-cost, open-hardware IoT platform can reliably acquire and display the key kinematic parameters of a multi-stage mechanical transmission, thereby providing a practical and reproducible laboratory tool for mechatronics and mechanical engineering education in the context of Industry 4.0.

2. System Description

2.1. Mechanical Transmission Rig

The transmission rig consists of five functional stages arranged in series (Figure 1). The drive source is a stepper motor, which is mechanically coupled to a spur gear stage, followed by a bevel gear stage, a toothed belt drive, and finally a lifting drum with a load attachment. The spur gear pair (z_1/z_2) provides the first speed reduction from the motor shaft to shaft V_1, while the bevel gear pair (z_3/z_4) redirects the power flow and maintains the required transmission ratio toward shaft V_2. The toothed belt drive then transmits motion from shaft V_2 to the lifting drum, ensuring positive engagement and slip-free operation under the considered loads. The overall transmission ratio and resulting shaft speeds were derived from standard kinematic relations for series-connected gear and belt stages. For the nominal operating condition, defined by a microstepping setting of 1/8 and a pulse delay of 350 µs in the stepper motor control, the theoretical rotational speed of the motor was calculated as approximately 106.6 rpm. With a total transmission ratio of 4:1, the corresponding theoretical drum speed is approximately 26.65 rpm. Table 1 summarises the key theoretical kinematic parameters of the transmission rig, including shaft speeds, torques and partial transmission ratios for each stage. The shaft speeds were obtained from the kinematic ratios of the spur, bevel and belt stages, based on the actual gear tooth numbers and pulley diameters of the manufactured elements, starting from the stepper motor speed defined by the selected microstepping ratio and pulse delay. The corresponding torques were calculated from a power-balance relation across the series-connected stages, accounting for friction losses in gear meshing, rolling-bearing support and belt engagement, following standard machine-element design procedures [3, 4, 6]. These values form the theoretical reference against which the experimentally measured speeds and loads are later compared. Main electronic components are summarised in Table 3.

Table 1. Theoretical kinematic parameters of the transmission rig

Element	Speed, rpm	Toque, Nm	Transmisson Ratio
Stepper motor	106.60	0.43	-
Shaft V_1 (spur gear output)	53.30	0.82	2
Shaft V_2 (bevel gear output)	53.30	0.73	1
Drum (belt drive output)	26.65	1.23	2

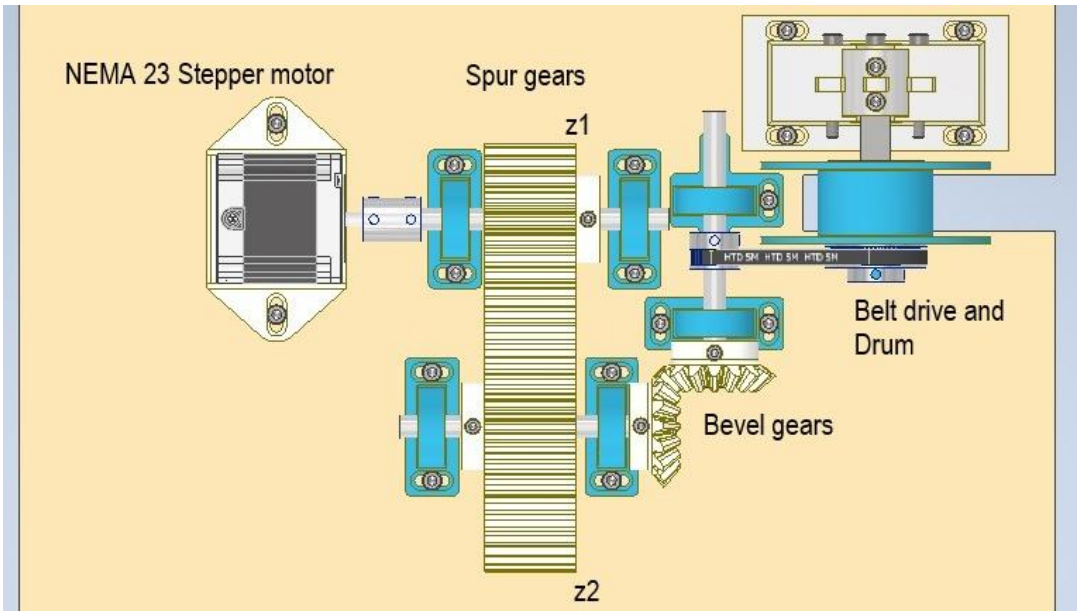


Figure 1. Transmission rig

2.2. Manufacturing and Assembly

All gear and transmission elements of the rig were modelled in Autodesk Inventor Professional 2024, using the results of the analytical design calculations as input geometry. The physical components were fabricated by fused deposition modelling (FDM) on a Bambu Lab H2S 3D printer. For the spur and bevel gears, Polyamide 6 (PA 6) filament was selected due to its favourable wear resistance and toughness under repeated meshing. Other structural components, such as supporting brackets and non-loaded housings, were manufactured from PLA filament to simplify printing and reduce material cost. Main 3D printing parameters are presented in Table 2. Shafts and bearing housings were specifically designed to accommodate standard SKF and FAG deep-groove ball bearings, ensuring low friction, proper alignment and reliable operation of the rotating elements. The individual components were subsequently assembled into a compact laboratory rig, with the stepper motor, transmission stages and lifting drum mounted on a common base frame. The assembled transmission rig, including the load attachment on the drum, is shown schematically in Figure 2.

Table 2 Additive Manufacturing (3D Printing) Parameters

Parameter	Value
Nozzle Diameter	0.4 mm
Layer Height	0.20 mm
Nozzle Temperature	260 °C
Bed Temperature	108 °C
Chamber Temperature	60 °C
Bed Adhesion	Outer brim (17 mm width)
Cooling Fan Speed	100%

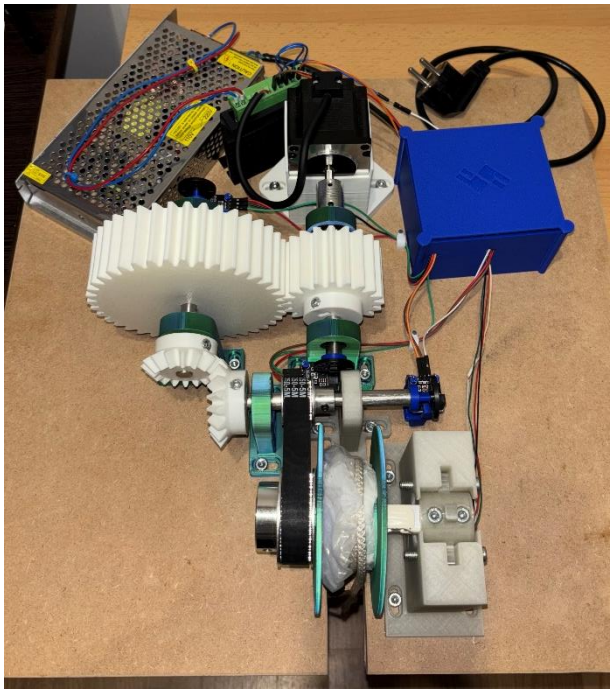


Figure 2. Assembly of the didactic power transmission rig

3. IoT Measurement System

The developed IoT system was implemented as a sensing and monitoring layer integrated with the transmission rig in order to acquire the key kinematic parameters during operation. The hardware configuration consists of an ESP32 microcontroller, a Nema 23 stepper motor, a TB6600 microstepping driver, a switched-mode power supply, a load cell with an HX711 module, and three infrared photoelectric sensors for rotational speed measurement. In this arrangement, the ESP32 acts as the central unit for sensor acquisition, motor control, and wireless data transmission, thereby connecting the physical transmission prototype with its digital monitoring subsystem (Table 3).

Load measurement was performed using a load cell mounted in the cantilever support, while the HX711 module was used to amplify the millivolt-level Wheatstone bridge output, perform 24-bit analogue-to-digital conversion, and reduce electrical noise before the signal was processed by the ESP32. Rotational speeds were measured at the free ends of the shafts using photoelectric sensors with slotted encoder disks, where shaft speed was determined

from pulse timing in the Arduino IDE environment. The advantage of the selected optical sensors is that, due to the integrated LM393 comparator, they provide a clean digital signal directly to the microcontroller without additional analogue-to-digital conversion.
The control and data acquisition software was developed in Arduino IDE and configured for real-time monitoring of RPM1, RPM2, RPM3, theoretical motor speed RPM_{TH}, and measured load values. The stepper motor was driven through the TB6600 driver in 1/8 microstepping mode, corresponding to 800 steps per revolution, while a pulse delay of 350 microseconds produced a theoretical motor speed of approximately 106.6 rpm. Depending on the operating state, the software classified the measured force signal as either static load or dynamic load, while measurement data were transmitted wirelessly via the ESP32 Bluetooth interface for real-time observation. The functional architecture of the implemented IoT measurement system is shown in Figure 3.

Table 3 Specifications of Main Electronic Components

Component	Model/Type	Function
Microcontroller	ESP32 SoC	Central control, Wi-Fi/BT communication
Primary Actuator	Nema 23	2-phase stepper motor (1.2 Nm)
Weight Sensor	Load Cell + HX711	Static and dynamic load measurement (24-bit AD)
Speed Sensor	Photoelectric	RPM measurement via infrared beam
Power Supply	SMPS	AC/DC conversion (230V to 24V/36V)

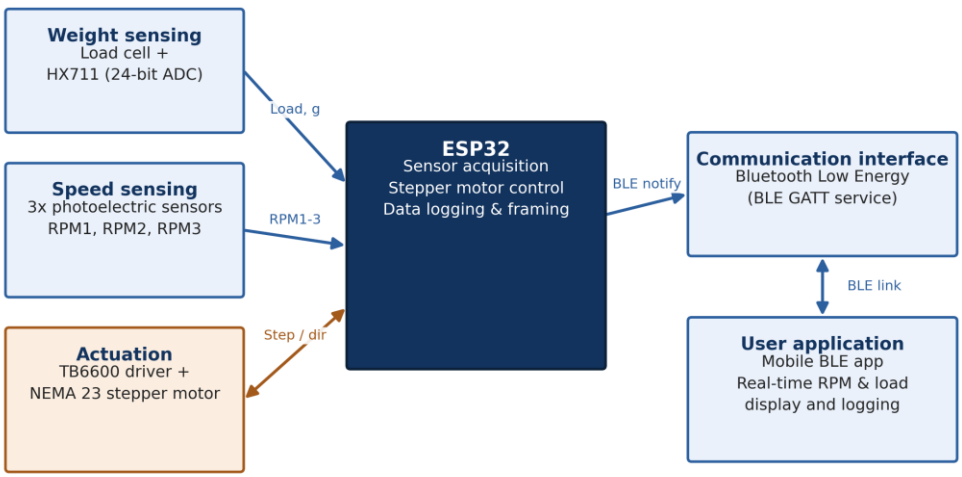
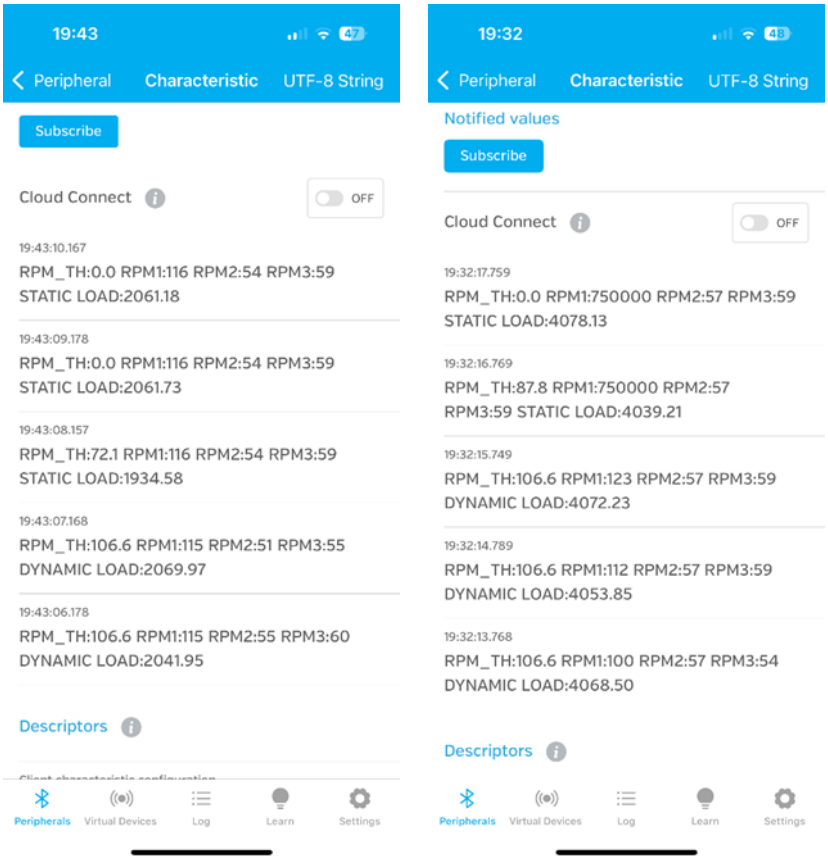


Figure 3. Functional block diagram of the IoT measurement system: sensors and actuation, ESP32 central unit, BLE communication interface, and user application

4. Results

During the experimental campaign the IoT system continuously recorded shaft speeds at three measuring points and the load acting on the lifting drum. The acquired data clearly showed the expected increase of torque and decrease of speed towards the drum shaft, in

line with the designed transmission concept (Figure 4). In steady-state operation, the measured speeds at all observed shafts remained practically constant over time, indicating stable operation of the transmission and correct alignment of the gear and belt stages. Transient effects were most pronounced during start-up and braking, where short-term oscillations of the measured speeds and load occurred due to elastic deformations of the 3D-printed elements and belt tension variations. These effects were particularly visible in the speed signals of the shafts connected by the belt drive, where small fluctuations around the mean value appeared before the system reached a stable regime. Nevertheless, the overall level of vibration and speed variation remained within acceptable limits for a didactic transmission rig, without any loss of synchronisation or noticeable step loss in operation. Measurement data were acquired and processed using the ESP32 microcontroller, which simultaneously sampled the load cell signal via the HX711 module and the pulse outputs of the three photoelectric speed sensors. The firmware, developed in the Arduino IDE environment, calculated shaft speeds from the measured pulse intervals and converted the load cell readings into force values based on a prior calibration procedure. All measured quantities were displayed in real time in a custom application interface and logged for subsequent analysis, enabling direct comparison between theoretical kinematic predictions and experimentally obtained time histories of speed and load. The recorded load cell signal confirmed that the transmission is capable of lifting the intended load without significant loss of speed or visible plastic deformation of the structural parts. At increased load levels, a slight increase in measured elastic deformation was detected, but without a critical influence on the kinematic behaviour of the system. From an educational point of view, the implemented IoT measurement system thus enables students to directly link theoretical design calculations with experimental data, and provides a compact platform for introductory studies of condition monitoring and IoT-based measurement in power transmission systems.



(a) (b)

Figure 4. Measurement results of rotational speed and mass for test loads: (a) 2 kg, (b) 4 kg

To quantify the agreement between the theoretical kinematic parameters given in Table 1 and the experimentally acquired data shown in Figure 4, Table 4 compares the theoretical shaft speeds with the corresponding values logged via the Bluetooth interface during steady-state (dynamic) operation (five samples per measurement point). The motor-side shaft and shaft V2 (bevel gear output) showed mean deviations of +6.0% and +3.9% from the theoretical values, respectively, consistent with the encoder signal noise and mounting tolerances discussed in Section 3. The drum-shaft sensor (RPM3), however, showed a substantially larger and consistent offset (mean +115%, i.e. approximately double the theoretical value), attributed to a mismatch between the encoder-disk slot count assumed in the firmware RPM calculation and the disk actually mounted on that shaft. This indicates a sensor-specific calibration issue rather than a mechanical transmission fault, and it will be corrected in a future revision of the measurement firmware.

Table 4. Comparison between theoretical and measured shaft speeds during steady-state operation

Measurement point	Theoretical speed, rpm	Measured speed (mean ± SD), rpm	Deviation, %
Motor-side shaft (RPM1)	106.60	113.0 ± 8.3	+6.0
Shaft V2, bevel gear output (RPM2)	53.30	55.4 ± 2.6	+3.9
Drum shaft (RPM3)	26.65	57.4 ± 2.7	+115.4

Table 5 compares the nominal test loads with the corresponding load-cell readings. The measured values deviated from the nominal 2 kg and 4 kg loads by +2.9% and +1.6% respectively, confirming accurate mass measurement within the expected sensor tolerance.

Table 5. Comparison between nominal and measured drum loads

Nominal load, kg	Measured load (mean ± SD), g	Deviation, %
2	2058.7 ± 11.9	+2.9
4	4062.4 ± 15.7	+1.6

5. Conclusion

The developed setup demonstrates that even relatively simple IoT hardware can significantly enhance the transparency, monitoring capability and educational value of conventional mechanical transmission systems. By combining mechanical design, additive manufacturing and IoT-based measurement in a single platform, the rig provides a suitable basis for further extensions, such as condition monitoring, vibration analysis or the application of basic artificial intelligence algorithms for anomaly detection. Future work may therefore focus on increasing measurement resolution, expanding the set of monitored variables and integrating cloud-based data storage and analysis to move towards more advanced cyber-physical system concepts.

Acknowledgements

This paper presents selected results of the master thesis completed and defended by Tomislav Solar under the supervision of Assistant Professor Ivan Grgić at the University of Slavonski Brod, Faculty of Mechanical Engineering, in 2026.

Funding

This research paper was funded by the University of Slavonski Brod through the institutional research project Analysis of the influence of design and process parameters of FDM technology on the mechanical and vibrational properties of polyamide PA6 tooth of a cylindrical spur gear for the purpose of optimizing the hybrid infill structure design (ASPFDM-PA6), financed by the European Union – NextGenerationEU. The views and opinions expressed in this paper are those of the author and do not necessarily reflect the official

position of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

6. Refrences

[1] Solar, Tomislav. PRIMJENA IoT SUSTAVA ZA MJERENJE KINEMATSKIH PARAMETARA NA PRIMJERU PRIJENOSNIKA SNAGE I GIBANJA Solar, Tomislav / Grgić, Ivan (mentor). Slavonski Brod, Sveučilište u Slavonskom Brodu, 2026

[2] Oberšmit, Eugen. Ozubljenja i zupčanici. Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1982

[3] Kljajin, Milan; Ivandić, Željko; Karakašić, Mirko. Elementi strojeva Zbirka projektno-konstrukcijskih zadataka. Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2018. (ISBN 978-953-6048-91-5)

[4] Križan, Božidar; Robert, Basan. Polimerni konstrukcijski elementi. Rijeka: Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2009. (ISBN 978-985-7142-43-8)

[5] Decker, Karl-Heinz. Elementi strojeva. Zagreb: Golden Marketing-Tehnička knjiga Zagreb, 2006. (ISBN 953-212-290-7)

[6] Kraut, Bojan. Strojarski priručnik. Zagreb: Tehnička knjiga, Zagreb, 2009.

[7] Cai, Xingcheng. Analyzing the Impact of Industry 4.0 and the Internet of Things on Business Policy - The Case Study // *Tehnički vjesnik*, 31(2024), 4; 1312-1323. https://doi.org/10.17559/TV-20240303001369

[8] Ahmad, Bilal; Azmat, Freeha; Colombo, Armando Walter; Veltink, Gerrit Jan. Teaching and Learning ICPS: Lessons Learned and Best Practices. Wiley, 2022. (ISBN 9781119987420)

[9] Oks, Sascha Julian. et al. Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook // *Inf Syst Front*, 26(2024), 1731–1772. https://doi.org/10.1007/s10796-022-10252-x

[10] Hercog, Darko; Tone, Lerher; Mitja, Truntič; Oto, Težak. Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices // *Sensors*, 23(2023), 15; 6739. https://doi.org/10.3390/s23156739

[11] Ryalat, Mutaz; Enrico, Franco; Hisham, Elmoaqet; Natheer, Almtireen; Ghaith, Al-Refai. The Integration of Advanced Mechatronic Systems into Industry 4.0 for Smart Manufacturing // *Sustainability*, 16(2024), 19; 8504. https://doi.org/10.3390/su16198504

[12] Koene, Ivar; Klar, Ville; Viitala, Raine. IoT connected device for vibration analysis and measurement // *HardwareX*, 7(2020), e00109. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00109

Polymer hydrogels as advanced multifunctional materials

Lj. Kratofil Krehula[1], E. Govorčin Bajsić[1], A. Šaravanja[1], I. Sutlović[1,*]

[1] University of Zagreb Faculty of Chemical Engineering and Technology, Marulićev trg 19, 10000 Zagreb, Croatia

[*]Corresponding author. E-mail: isutlo@fkit.unizg.hr

Abstract

Polymer hydrogels are a class of materials characterized by the ability to contain, absorb, and retain high quantity of water. They are gel-like materials with a three-dimensional structure of cross-linked hydrophilic polymer chains. Their preparation is carried out using various natural or synthetic polymers through physical, chemical, or irradiation-induced cross-linking methods. Polymer hydrogels appear as promising materials in various fields and are used in medical, pharmaceutical, agricultural and environmental applications, as well as for cosmetic products and food preservation. Polymer hydrogels should exhibit adequate mechanical stability during both characterization and their intended applications. Furthermore, many applications require their electrical conductivity, antimicrobial properties or strong adhesion to different surfaces. Polymer hydrogels may be considered as multifunctional materials due to their ability to simultaneously exhibit properties such as high-water content, biocompatibility, self-healing or responsiveness to biological, chemical or physical stimuli. Some studies aim to improve the properties of polymer hydrogels by overcoming their limitations, such as poor mechanical performance, through the incorporation of fillers into the polymer matrix. Such hydrogel systems are known as polymer composite hydrogels. This review will focus on presenting the different types of polymer hydrogels, their preparation procedures, various applications as well as the strategies for the improvement of their properties.

Key words: advanced materials, multifunctionality, polymer hydrogels, water.

1. Introduction

Polymer hydrogels are three-dimensional networks composed of hydrophilic polymers with crosslinked chains [1]. Their main characteristic is the ability to absorb, contain, and retain large amounts of water while maintaining the structural integrity. Such high content of water gives them a soft and rubbery consistency as well as flexibility and makes them similar to living tissues [2]. The amount of water that a hydrogel can store varies depending on its composition, even to more than 90% of the total mass. The amount of water stored in the hydrogel structure depends also on the degree of crosslinking. In general, the mass fraction of water in a hydrogel is greater than the mass fraction of the polymer [3]. It is important to

point out that the water content in hydrogel can vary due to the swelling or drying, which may be influenced by different external conditions like temperature, type of solvent or the conditions of application. The water in hydrogels may be strongly or weekly bound to the polymer network. Some water content is free water [4].

The high hydrophilic nature of hydrogels arises from the presence of hydrophilic functional groups, including hydroxyl, carboxyl, amide or amino groups, along the polymer backbone. Crosslinks in hydrogels may be formed by covalent bonds or by non-covalent intermolecular forces, such as hydrogen bonding, ionic interactions or van der Waals forces [2].

Hydrogels are widely used in medicine, pharmacy, cosmetics, agriculture, environmental engineering, for hygienic products and for some other applications. In the field of medicine, hydrogels are used to produce contact lenses, wound dressings in order to cover skin wounds (even when a large area of skin is damaged or missing), for treating skin diseases, for production of biosensors and in plastic surgery for aesthetic operations. In pharmaceutical applications, hydrogels are used to carry out controlled and targeted drug release. In agriculture they are used as water-retaining materials. Polymer hydrogels are used in cosmetics for moisturizing, hydrating and anti-aging products, for skincare, sunscreen or protective formulations. Environmental engineering uses hydrogels for water purification or wastewater treatment. Hygienic purposes include hydrogels for absorbent products, moist wipes, hand hygiene, antiseptic gels etc. Other applications include hydrogels as components for flexible electronics or soft robotics due to their tunable mechanical properties and responsiveness to external stimuli. They are also used for production of super-porous or super-absorbent materials [1, 2, 5].

This article presents an overview of polymer hydrogels, covering their classification, preparation procedures, important properties and various applications across different scientific and technological fields. It will also present the intentions and strategies for the improvement of the properties of polymer hydrogels.

2. Historical development of hydrogels

Polymer hydrogels are discovered through the work of Otto Wichterle and Drahoslav Lím in 1953 who synthesized the first hydrogel based on poly(2-hydroxyethyl methacrylate) (pHEMA), which was used for soft contact lenses [6]. In 1980 Lim and Sun studied the application of calcium alginate for cell encapsulation [7]. After that, in the 1980s, hydrogels based on collagen were used for burn dressings [8]. Since then, hydrogel research has expanded significantly, progressing from such applications to stimuli-responsive, advanced and multifunctional hydrogels. Today, hydrogels are used in various fields, from simple to smart materials and products.

3. Polymers used for hydrogel preparation

By their origin hydrogels can be classified into three categories: natural, synthetic and hybrid (Table 1) [1,2].

Table 1. Polymers used for hydrogel preparation

Natural polymers	Synthetic polymers	Hybrid composition
alginate	poly(vinyl alcohol)	alginate + poly(vinyl alcohol)
chitosan	poly(acrylamide)	gelatin + poly(ethylene glycol)
collagen	poly(ethylene glycol)	alginate + poly(acrylamide)
gelatin	poly(2-hydroxyethyl methacrylate)	
agarose		
starch		

Natural hydrogels are made of natural polymers including polysaccharides and proteins. They are similar to biological tissues, biocompatible, biodegradable and non-toxic which makes them especially suitable for medical and pharmaceutical applications. The disadvantages may be their poor mechanical strength and short-term stability. Synthetic hydrogels include polymer components like poly(vinyl alcohol), poly(acrylamide), poly(ethylene glycol) or and poly(2-hydroxyethyl methacrylate). They possess improved mechanical chemical, and physical properties as well as higher stability and reproducibility as well as good processability. However, they are sometimes less suitable for some application than natural polymer hydrogels due to synthetic origin. Hybrid hydrogels (semi-synthetic) combine natural and synthetic polymers to integrate the advantages of both systems. Such hydrogels are widely used in advanced applications like systems for drug delivery, in tissue engineering and regenerative medicine.

3.1. Hydrogels based on poly(vinyl alcohol)

Poly(vinyl alcohol), abbreviated PVA, is biodegradable and biocompatible water-soluble polymer. It is chemically resistant and non-toxic as well as highly available due to low price. PVA may be used in a form of hydrogel for the production of wound dressings, synthetic tissues and in drug delivery systems. One of the important applications of PVA hydrogels is in the form of wound dressings in order to absorb excess of liquid, to protect the wound from the environment, to promote wound healing and to prevent bacterial infection. Such hydrogels are also characterized by elastic and soft nature, which reduces and prevents irritation of tissues. Some hydrogels may be prepared with the addition of antimicrobial agent to protect the wound from microorganisms, to improve the process of wound healing and to avoid infections [1, 9]. Prepared poly(vinyl alcohol) hydrogel is presented in Figure 1.

Figure 1. Preparation of hydrogel based on poly(vinyl alcohol) [10]

4. Methods for hydrogel preparation

For production of hydrogels, method which creates a cross-linked polymer is needed. The preparation methods of hydrogels are divided into physical and chemical [1,2]. Some studies mention the use of ionizing radiation as a third type of hydrogel preparation [2], while some literature considers it as chemical method of hydrogel preparation. In hydrogels obtained by chemical methods, polymer chains are interconnected by covalent bonds. Such hydrogels can be synthesized by radical polymerization of hydrophilic monomers in the presence of crosslinkers or by crosslinking of water-soluble polymers (containing hydroxyl or amine groups) with some crosslinking agents like aldehydes. Physical methods of hydrogel preparation result with physically linked polymer chains where weak, secondary forces are created (hydrogen bonds, van der Waals and Coulomb forces, electrostatic interactions or chain overlap). Hydrogels prepared in this way are often called temporary or reverse hydrogels because they are unstable and can be degraded and dissolved if some external conditions are changed. The advantage of hydrogels prepared by physical methods is that there are no toxic crosslinking agents and the possibility of hydrogel modification after synthesis. The disadvantage of physically crosslinked hydrogels are relatively poor mechanical properties. The use of ionizing radiation creates free radicals along the polymer chains which then connect with each other building the gel network and form cross-links. Differences between chemical and physical methods of hydrogel preparation are listed in Table 2.

Table 2. Physical and chemical methods used for hydrogel preparation

Hydrogel characteristics	Chemical methods	Physical methods
Connecting of polymer chains	formation of covalent bonds	polymer chains linked by secondary forces
Cross-linking agents	yes	no
Strength of bonds	strong	weak
Reversibility	no	yes
Mechanical properties	good	sometimes poor
Adjustment of properties	not so possible	possible

4.1. Physical method of freezing and thawing

Hydrogels based on hydrogen bonding can be formed by freeze-thaw cycles. Some polymers, like poly(vinyl alcohol), are especially suitable for such preparation procedure due to the presence of hydroxyl groups in PVA. The gel obtained by this method is called cryogel. There are three phases in a hydrogel: an aqueous phase in which there is a very low concentration of polymers, an amorphous phase and a crystalline phase that partially limits the movement of amorphous polymer chains. During process of freezing, water freezes and spreads towards the surface. The important mechanism in this method is precisely the separation of the system into one phase rich in PVA and one phase rich in water. When the PVA chains approach and come into contact, hydrogen bonds are formed and crystallites are formed. Such interactions remain intact during the thawing process, and three-dimensional networks of hydrogels are prepared [11].

5. The most important applications of polymer hydrogels

Hydrogels are today widely used in medicine, pharmacy, cosmetics, for the production of explosives, sensors and packaging, in agriculture, electronics and many other applications. The swelling capacity of hydrogels under biological conditions makes them particularly suitable for biomedical applications, such as drug delivery and tissue engineering. This is where their insoluble crosslinked structure becomes very important, enabling the effective release of active substances. Hydrogels are highly compatible with human tissues. For that reason, they are very suitable for the production of contact lenses, for wound healing and treating skin diseases. A thin layer of hydrogel is applied to the areas where skin is damaged or missing. Then hydrogel starts to absorb fluid from the wound, helps to keep the wound moist, which for that reason heals faster and leaves less visible scars after healing. Polymer hydrogels are also used for aesthetic operations in plastic surgery because of their elastic and soft nature and flexibility.

6. The advanced types of hydrogels

The improvement in the properties of hydrogels can be achieved by preparing composite polymer hydrogels where the polymer hydrogel is the matrix into which various types of fillers are added. Such composite systems can be prepared because of the large space between the crosslinked polymer chains in the hydrogel. In such systems polymer network is combined with dispersed fillers like inorganic particles, clays, cellulose-based components or other reinforcing agents. Composite hydrogels are prepared in order to overcome limitations like low mechanical properties of pure hydrogels (low strength, elasticity, stiffness and toughness). The low mechanical stability of pure hydrogels will be overcome but, at the same time, hydrogel will remain its high-water content and the overall appearance. It is very important to point out that, depending on the type of the used filler, such hydrogel composite systems can introduce functionalities like self-healing, electrical conductivity or antimicrobial activity [2, 12].

In biomedical engineering, composite hydrogels are widely used in drug delivery systems, wound dressings and in tissue engineering. Their design can be tailored to achieve

controlled degradation rates, stimuli responsiveness (pH, temperature, or ionic strength) and enhanced interaction with living cells.

It is very interesting to mention that the addition of bee pollen can also contribute in improving the properties of hydrogels and in achieving of some hydrogels' functionalities like antimicrobial activity [10, 12], Figure 2. Bee pollen is a biodegradable and affordable bee product and is available in pharmacies and stores with healthy food. Pollen is a plant product rich in biologically active substances.

Figure 2. Hydrogel based on poly(vinyl alcohol) with the addition of bee pollen [10]

It is also possible to prepare advanced types of hydrogels like superabsorbent polymers (SAPs) that are characterized by highly powerful possibility of water holding (from 10 to even 1000 times of their original volume or weight). They are used in agriculture and for hygienic and cosmetic products (diapers, sanitary napkins etc.). Furthermore, such hydrogels are also used for special purposes where the role of hydrogel is in excellent holding of high water quantities or the quantities of some other liquids [2]. There is also a category of super-porous hydrogels (SPHs) that were considered as types of materials that intensively swell to very large dimensions (independent of their initial size) [2].

7. Conclusion

Polymer hydrogels are three-dimensional materials composed of hydrophilic polymer chains that absorb and retain large amounts of water They have characteristic cross-linked structure, which prevents hydrogels to dissolve, they only swell in liquids. The amount of water stored in the hydrogel structure depends on its chemical composition and on the nature and degree of cross-linking. Hydrogels can be classified according to their origin, composition, type of cross-links between polymer chains and the field of application.

The property of hydrogels to swell makes them ideal candidates for medical, pharmaceutical, cosmetic, hygienic, agricultural and some other applications. Their insoluble cross-linked structure enables efficient immobilization and release of active substances and biomolecules. Biocompatibility is another very important property of hydrogels.

Composite polymer hydrogels represent an advanced group of materials where the system composed of polymer matrix and embedded fillers enables multifunctional performance beyond that of traditional hydrogels.

Acknowledgement: This research was conducted within the project FunPolHidro (112107) financed by the European Union's NextGenerationEU fund from the source 581 – The recovery and resilience mechanism, in the frame of Programme financing of public higher education institutions and public scientific institutes.

8. Literature

[1] Jiang, Xiancai; Xiang, Nanping; Zhang, Hongxiang; Sun, Yujun; Lin, Zhen; Hou, Linxi. Preparation and characterization of poly(vinyl alcohol)/sodium alginate hydrogel with high toughness and electric conductivity // *Carbohydrate Polymers*, 186(2018); 377–383. (ISSN 1879-1344)

[2] Ahmed, Enas M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review // *Journal of Advanced Research*, 6(2015); 105–121. (ISSN 2090-1224)

[3] Karoyo, Abdalla H.; Wilson, Lee D. A Review on the Design and Hydration Properties of Natural Polymer-Based Hydrogels // *Materials*, 14(2021);1095. (ISSN 1996-1944)

[4] Gun'ko, Vladimir M.; Savina, Irina N.; Mikhalovsky, Sergey V. Properties of Water Bound in Hydrogels // *Gels,* 3(2017); 37. (ISSN 2310-2861)

[5] Caom Huan; Duan, Lixia; Zhang, Yan; Cao, Jun; Zhang, Kun. Current hydrogel advances in physicochemical and biological response-driven biomedical application diversity // *Signal Transduction and Targeted Therapy* 6(2021); 426. (ISSN 2059-3635)

[6] Wichterle, Otto. Hydrophilic gels for biological use // *Nature* 185(1960); 117-118. (ISSN 1476-4687)

[7] Lim, Franklin; Sun, Anthony M. Microencapsulated islets as bioartificial endocrine Pancreas // *Science* 210(1980), 4472; 908-910. (ISSN 1095-9203)

[8] Hoffman, Allan S. Hydrogels for biomedical applications // *Advanced Drug Delivery Reviews* 64(2012); 18-23. (ISSN: 1872-8294)

[9] Hubbell, Jeffrey A. Hydrogel systems for barriers and local drug delivery in the control of wound healing // *Journal of Controlled Release* 39(1996); 305-313. (ISSN 1873-4995)

[10] Šaravanja, Ana. master's thesis Utjecaj peludi na svojstva polimernih hidrogelova (The influence of pollen on the properties of polymer hydrogels, University of Zagreb Faculty of Chemical Engineering and Technology, Zagreb, 2023.

[11] Holloway, Julianne L., Lowman, Anthony M.; Palmese, Giuseppe R. G The role of crystallization and phase separation in the formation of physically cross-linked PVA hydrogels // *Soft Matter* 9(2013); 826-833. (ISSN 1744-6848)

[12] Tyliszczak, Božena; Walczyk, Dorota ; Wilczyński Sławomir. Acrylic hydrogels modified with bee pollen for biomedical applications // *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 5(2015); 10–14.

Primjena tehničkih materijala u sustavima za iskorištavanje energije mora
Application of technical materials in marine renewable energy systems

S. Kladarić[1,*], P. Ramljak[2], I. Kladarić[2]

[1]Tehnički odjel, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Hrvatska
[2]Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: skladaric@unisb.hr

Sažetak
Primjena odgovarajućih tehničkih materijala u sustavima za iskorištavanje energije mora predstavlja jedno od ključnih područja razvoja tih sustava. Energija mora ima veliki potencijal, ali je njezino iskorištavanje otežano zbog izrazito zahtjevnih eksploatacijskih uvjeta u morskom okolišu. Ti uvjeti uključuju koroziju, eroziju, biofouling i velika mehanička opterećenja. Zbog toga je izbor materijala presudan za učinkovitost, sigurnost, trajnost i ekonomičnost sustava. U radu su sažeto predstavljeni metalni, polimerni i kompozitni materijali, njihova svojstva i područja primjene za izradu komponenata različitih sustava za iskorištavanje energije mora. Poseban naglasak stavljen je na pojedine suvremene materijale i razvoj novih rješenja otpornijih na agresivni morski okoliš.

Ključne riječi: energija mora, sustavi za iskorištavanje energije mora, tehnički materijali, izbor materijala

Abstract
The use of appropriate technical materials in marine renewable energy systems is a key area of development for these systems. Marine energy has great potential, but its exploitation is hampered by the highly demanding conditions of the marine environment. These conditions include corrosion, erosion, biofouling and high mechanical loads. Consequently, material selection is crucial for the efficiency, safety, durability and economic performance of the system. This paper briefly presents metallic, polymer and composite materials, their properties and their areas of application in the manufacture of components for various marine renewable energy systems. Particular emphasis is placed on selected modern materials and on the development of new solutions that are more resistant to the aggressive marine environment.

Key words: marine energy, marine renewable energy systems, technical materials, material selection

1. Uvod

Obnovljivi izvori energije su prirodni izvori energije koji se mogu obnavljati u cijelosti ili djelomično. Ekološki su prihvatljiviji od fosilnih goriva jer se njihovim korištenjem proizvodi manje stakleničkih plinova, što doprinosi smanjenju klimatskih promjena. Posljednjih nekoliko desetljeća njihovo iskorištavanje ima tendenciju rasta, prvenstveno zbog ekoloških, ali i zbog niza drugih ekonomskih i geopolitičkih razloga.

Obnovljivi izvori energije su: kinetička energija vjetra (vjetroenergija), Sunčeva energija, biomasa, toplinska energija Zemljine unutrašnjosti i vrući izvori (geotermalna energija), potencijalna energija vodotoka (hidroenergija) te energija mora.

U Strategiji Europske unije za iskorištavanje potencijala energije iz obnovljivih izvora na moru za klimatski neutralnu budućnost iz studenoga 2020. godine navedeno je kako europski laboratoriji i industrije brzo razvijaju niz tehnologija za iskorištavanje energije mora za proizvodnju zelene električne energije, od plutajućih odobalnih vjetroelektrana do tehnologija za iskorištavanje energije oceana, kao što su energija valova ili plime i oseke, plutajuća fotonaponska postrojenja i upotreba algi za proizvodnju biogoriva. Europska unija ima najveći morski prostor na svijetu i jedinstvenu priliku za razvoj energije iz obnovljivih izvora na moru zahvaljujući raznolikosti i komplementarnosti svojih morskih bazena (Sjeverno more, Baltičko more, Atlantski ocean EU-a, Sredozemno more, Crno more). Industrija EU-a svjetski je predvodnik u razvoju tehnologija za iskorištavanje energije oceana, uglavnom energije valova te energije plime i oseke. Poduzeća iz EU-a posjeduju 66 % patenata povezanih s energijom plime i oseke te 44 % patenata povezanih s energijom valova, dok su 70 % svjetskih kapaciteta za energiju oceana razvila poduzeća sa sjedištem u EU-27 [1].

Iako Hrvatska još nema komercijalne elektrane koje koriste energiju valova ili morskih struja, posljednjih godina provodi se niz znanstvenih i razvojnih aktivnosti usmjerenih prema procjeni energetskog potencijala Jadrana i razvoju odgovarajućih tehnologija za iskorištavanje energije mora. Novija istraživanja pokazuju da energija valova predstavlja najperspektivniji oblik energije mora za hrvatski dio Jadrana, dok su potencijali plime i oseke ograničeni zbog malih amplituda morskih mijena [2].

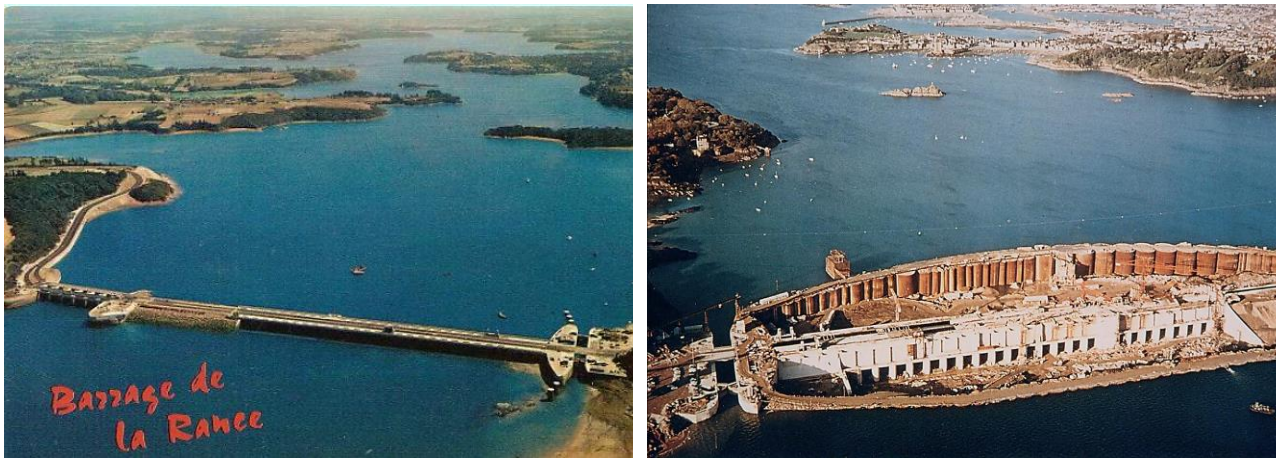
Posljednjih godina razvijaju se pilot-projekti i istraživačke inicijative usmjerene na primjenu energije valova. Najznačajniji primjer predstavlja projekt proizvodnje zelenog vodika iz energije valova u luci Žigljen na otoku Pagu, koji provodi hrvatska tvrtka Leonitus u okviru međunarodne platforme NACHIP (*North Adriatic Clean Hydrogen Investment Platform*).

2. Sustavi za iskorištavanje energije mora

Mora i oceani zauzimaju približno 71 % Zemljine površine čime predstavljaju jedan od najvećih i još uvijek nedovoljno iskorištenih obnovljivih izvora energije. Vrijednosti teorijskih godišnjih potencijala pojedinih podvrsta energije mora su sljedeće:

- energija plime i oseke: > 300 TWh/a
- energija morskih struja: > 800 TWh/a
- energija osmoze: 2000 TWh/a
- toplinska energija mora: 10 000 TWh/a
- energija morskih valova: 8000…80 000 TWh/a [3].

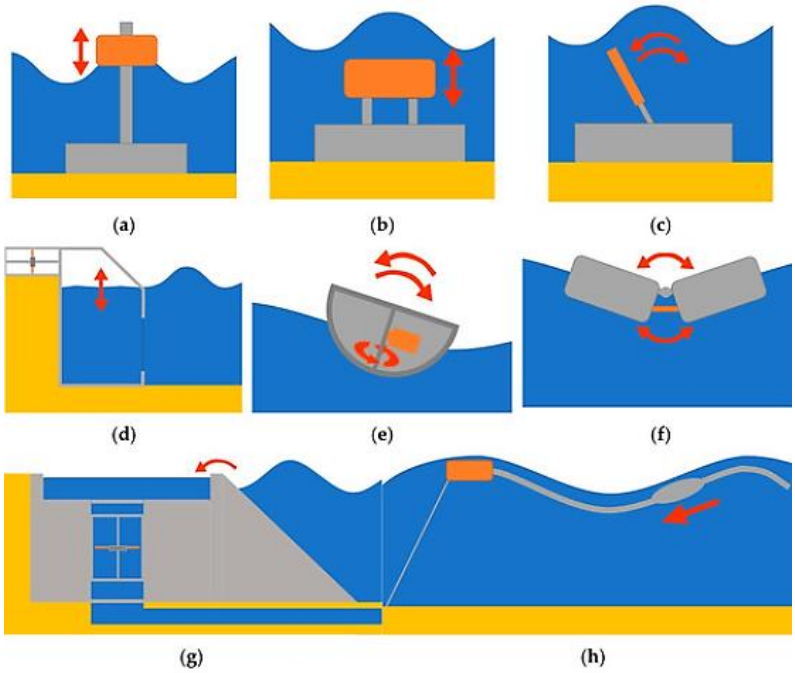
Postrojenja za pretvorbu energije plime i oseke te energije valova i morskih struja u električnu energiju općenito se mogu nazvati hidroelektranama.
Za iskorištavanje energije morskih mijena, odnosno potencijalne energije plime i oseke potrebno je odabrati pogodno mjesto na morskoj obali (ušća rijeka i uvale) na kojem je velika amplituda plime (min. 5…7 m) i na kojem postoji mogućnost, izgradnjom brane (pregrade), izolirati dio morske površine radi stvaranja akumulacijskog bazena.
Voda pokreće hidrauličke turbine u oba smjera, i kada plima puni akumulacijski bazen i kada se tijekom oseke vraća u more. Nedostaci ovih sustava su visoki troškovi ulaganja, ciklički rad ovisan o mjesečevim mijenama i veliki utjecaj na lokalni ekosustav.
Najstarija elektrana na plimu i oseku puštena je u pogon 1966. godine, a nalazi se na estuariju rijeke La Rance, na sjeverozapadu Francuske u Bretanji (slika 1.). Ugrađene su 24 vodne turbine s ukupnom instaliranom snagom 240 MW. Plimna brana je duga 750 m, od čega hidroelektrana zauzima 332,5 m. Plimno jezero koje se stvori morskim mijenama je oko 22,5 km^2 [4].
Godine 2011. puštena je u pogon plimna hidroelektrana Sihwa (Sihwa Lake Tidal Power Station) u Južnoj Koreji s trenutno najvećom instaliranom snagom na svijetu od 254 MW.



Slika 1. Plimna hidroelektrana La Rance [4]

Kinetička energija stalnih morskih i oceanskih struja iskorištava se na sličan način kao i energija vjetra, pomoću podvodnih turbina koje su učvršćene za morsko dno ili pomoću plutajućih platformi. Gustoća morske vode je oko 800 puta veća od gustoće zraka, stoga podvodne turbine mogu biti znatno manje od vjetroturbina, a proizvoditi jednaku količinu snage.
Osmotska energija, odnosno energija gradijenta saliniteta oslobađa se na ušćima rijeka gdje se spajaju slatka (riječna) i slana (morska) voda. Slatka i slana voda odvojene su polupropusnom membranom. Slatka voda prirodno putuje prema slanoj strani kako bi izjednačila koncentraciju, stvarajući visoki hidraulički tlak koji se usmjerava na turbinu.
Toplinska energija mora koristi temperaturnu razliku između toplog površinskog mora (oko 20…25 °C) i hladnog dubokog mora (oko 4 °C na dubinama od 1000 m). Razlika u temperaturi mora biti minimalno 20 °C, što ograničava primjenu na tropska mora.

Za iskorištavanje energije morskih valova koja ima najveći potencijal, koriste se različiti obalni, priobalni i pučinski uređaji, raznih veličina i valnih karakteristika (slika 2.). Pretvarači energije morskih valova pretvaraju kinetičku i potencijalnu energiju vodenih valova u električnu energiju.



Slika 2. Različite vrste pretvarača energije morskih valova:
(a) točkasti apsorber, (b) potopljeni pretvarač temeljen na razlici tlakova, (c) pretvarač oscilirajućeg gibanja valova, (d) pretvarač temeljen na oscilirajućem vodenom stupcu, (e) pretvarač s rotirajućom masom, (f) prigušivač valova, (g) preljevni pretvarač, (h) pretvarač izbočenih valova [2]

3. Zahtjevi na svojstva materijala

Sustavi za iskorištavanje energije mora izloženi su stalnom djelovanju slane vode, cikličkim mehaničkim opterećenjima zbog valova i morskih struja, promjenama temperature i tlaka te biološkim utjecajima. Zbog otežanog održavanja, materijali koji se koriste za izradu pojedinih komponenata moraju osigurati pouzdan rad tijekom dugog vremenskog razdoblja i bez čestih intervencija. Razvoj i primjena sustava za iskorištavanje energije mora zahtijeva stoga posebnu pažnju pri izboru materijala koji moraju zadovoljiti niz zahtjeva:

- otpornost na koroziju u slanoj vodi (Slana voda sadrži kloride koji ubrzavaju elektrokemijsku koroziju, što uzrokuje narušavanje integriteta metalnih konstrukcija.)
- otpornost na eroziju česticama i kapljevinom (Čestice pijeska i stalno gibanje vode uzrokuju trošenje površine materijala, osobito na lopaticama turbina.)
- otpornost na statička i dinamička opterećenja (Morski valovi i struje uzrokuju ciklička opterećenja koja s vremenom dovode do umora i otkaza materijala.)
- otpornost na biofouling (Nakupljanje mikroorganizama, algi i školjki na površini pojedinih dijelova smanjuje učinkovitost sustava i povećava naprezanja u materijalu.)
- pouzdanost, dugotrajnost i niski troškovi održavanja [5].

4. Tehnički materijali u sustavima za iskorištavanje energije mora

Pojedine komponente sustava za iskorištavanje energije mora izrađuju se od različitih metalnih, polimernih i kompozitnih materijala odgovarajućih svojstava.

4.1. Metalni materijali

Metalni materijali su najzastupljeniji konstrukcijski materijali u morskim energetskim sustavima jer imaju visoku čvrstoću, krutost i otpornost na dinamička opterećenja. Njihova primjena obuhvaća nosive konstrukcije valnih pretvarača, potporne konstrukcije plimnih turbina, stupove i temelje, osovine, zupčanike i ležajeve, različite spojne elemente, podvodne cjevovode itd.
Najčešće korišteni metalni materijali su: konstrukcijski čelici, nehrđajući čelici, aluminijske legure te u novije vrijeme titanove legure i Ni-Al bronce [6].

4.1.1. Konstrukcijski čelici

Konstrukcijski čelici koriste se za izradu velikih nosivih konstrukcija zbog povoljnog odnosa cijene i mehaničkih svojstava. Njihova primjena obuhvaća: temelje, okvire, stupove, sidrene sustave te podvodne potporne konstrukcije plimnih i valnih elektrana.
Prednosti su im velika nosivost (zbog visoke čvrstoće i krutosti), dobro poznata tehnologija proizvodnje, dobra zavarljivost, relativno jednostavna obrada te široka dostupnost i relativno niska cijena. Glavni nedostaci su im velika masa pojedinih komponenata zbog visoke gustoće materijala, izražena sklonost koroziji u morskoj vodi i potreba za redovitim održavanjem. Zbog toga se čelične konstrukcije gotovo uvijek dodatno štite zaštitnim premazima ili sustavima katodne zaštite kako bi im se produljio vijek trajanja.
Najčešće korišteni konstrukcijski čelici su: S235JR, S275JR, S355J2+N, S420ML i S460ML. Za izradu offshore konstrukcija posebno se koriste S355G10+N, S355G8+N i S420G2+Q. Iz navedenih oznaka je vidljivo da minimalne granice razvlačenja za područje najmanjih debljina ovih čelika iznose od 235 MPa do 460 MPa.

4.1.2. Nehrđajući čelici

Za izradu dijelova izloženih morskoj vodi koriste se nehrđajući, odnosno korozijski postojani čelici s povećanim udjelom kroma, nikla i molibdena.
Njihove prednosti su: visoka korozijska postojanost, dobra mehanička svojstva i dugotrajnost. Nedostatak im je viša cijena u odnosu na standardne konstrukcijske čelike.
Ovi čelici se koriste za izradu turbinskih osovina, raznih spojnih elemenata i dijelova podvodnih mehanizama.
Najčešće korišteni nehrđajući čelici su:

- austenitni nehrđajući čelik X5CrNi18-10 (AISI 304) - za sekundarne konstrukcije, zaštitne obloge i kućišta opreme (nije prikladan za izradu dijelova trajno uronjenih u morsku vodu)
- austenitni nehrđajući čelik X2CrNiMol17-12-2 (AISI 316 L) - za cjevovode, vijčane spojeve i osovine (jedan od najčešće korištenih materijala u morskoj energetici)

- austenitno-feritni duplex čelik X2CrNiMoN22-5-3 (AISI S32205) i austenitno-feritni superduplex čelik X2CrNiMoN25-7-4 (AISI S32750) - za osovine turbina plimnih hidroelektrana, podvodne konstrukcije i tlačne cjevovode (ovi čelici su znatno veće čvrstoće od austenitnih čelika, iznimne otpornosti na rupičastu koroziju i vrlo dobre otpornosti na umor materijala) [7].

U tablici 1. navedene su vlačne čvrstoće i granice razvlačenja najčešće korištenih nehrđajućih čelika. Općenito se čelici s višim vrijednostima svojstava mehaničke otpornosti koriste za izradu dijelova izloženih visokim opterećenjima.

Tablica 1. Mehanička svojstva najčešće korištenih nehrđajućih čelika [7]

Čelik	Vlačna čvrstoća R_m, MPa (meko žareno stanje)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa (rastvorno žareno stanje)
X5CrNi18-10	500…750	195
X2CrNiMol17-12-2	490…700	190
X2CrNiMoN22-5-3	640…950	450
X2CrNiMoN25-7-4	730…1000	500…550

4.1.3. Aluminijske legure

Aluminijske legure su znatno lakše od čelika te imaju dobru otpornost na koroziju zahvaljujući tankom pasivnom oksidnom sloju. Prednosti su im niska gustoća (mala masa pojedinih komponenata), vrlo dobra otpornost na koroziju, dobra zavarljivost i jednostavna obrada, a nedostaci u odnosu na čelike su niži modul elastičnosti (manja krutost), niža čvrstoća i manja otpornost na umor materijala. Primjenjuju se za izradu plutajućih konstrukcija (nosači, okviri, platforme), kućišta opreme i raznih konstrukcijskih dijelova.
Najčešće korištene aluminijske legure su EN AW-5083 (AlMg4,5Mn0,7), EN AW-6082 T6 (AlSi1MgMn) i EN AW-6061 T6 (AlMg1SiCu) [6].

4.1.4. Titan i titanove legure

Titan i titanove legure se smatraju jednima od najotpornijih metalnih materijala za primjenu u morskom okolišu. Prednosti su im iznimna otpornost na koroziju, niska gustoća i visoka specifična čvrstoća (omjer čvrstoće i gustoće), a nedostaci vrlo visoka cijena i materijala i proizvodnje. Zbog toga se koriste samo za izradu posebno zahtjevnih dijelova kod kojih su dugotrajnost i pouzdanost od presudne važnosti.
Komercijalno čisti titan (Grade 2 - titanova legura s min. 99 %Ti) primjenjuje se za izradu cjevovoda, izmjenjivača topline, spojnih elemenata, kućišta podvodnih senzora i elemenata katodne zaštite zbog iznimne otpornosti na koroziju u morskoj vodi.
Za mehanički opterećenije komponente, poput osovina i rotora plimnih turbina, češće se koriste titanove legure, osobito Ti-6Al-4V (najpoznatija α+β titanova legura vlačne čvrstoće 900…1000 MPa) i Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr (β titanova legura vlačne čvrstoće 1200…1400 MPa), koje uz izvrsnu korozijsku postojanost imaju i vrlo visoku čvrstoću [6].

4.1.5. Nikal-aluminijske bronce

Posebno mjesto u morskim energetskim sustavima zauzimaju legure bakra s niklom i aluminijem. Najviše je u primjeni nikal-aluminijska bronca CuAl10Ni5Fe4 (vlačne čvrstoće 620…760 MPa) koja se kao alternativa nehrđajućim čelicima koristi za izradu rotora plimnih turbina, pumpi, ventila, kućišta ležajeva, hidrauličkih komponenata, podvodnih spojnih elemenata itd. Ova bakrova legura je izvrsne otpornosti na koroziju u morskoj vodi, na abraziju i kavitacijsku eroziju, dobre je livljivosti i visoke otpornosti na umor materijala.

4.2. Polimerni materijali

Prednosti polimernih materijala su niska gustoća, jednostavna proizvodnja, dobra otpornost na morsku vodu i dobra kemijska postojanost, a nedostatak manja mehanička otpornost u odnosu na metalne i kompozitne materijale, zbog čega se uglavnom koriste za pomoćne komponente, a vrlo rijetko za nosive konstrukcije.

Najčešće korišteni plastomeri su:

- PE-HD - polietilen visoke gustoće (za podvodne cjevovode, plovke i zaštitne elemente)
- PP - polipropilen (za spremnike i kućišta)
- PVC - poli(vinil-klorid) (za cjevovode niskog tlaka i zaštitne cijevi)
- PA6 i PA66 - poliamidi (za ležajne čahure i klizne elemente).

Elastomeri imaju važnu ulogu u osiguravanju pouzdanog rada sustava jer se koriste za izradu komponenata koje služe za brtvljenje, prigušivanje vibracija, zaštitu spojeva i apsorpciju udarnih opterećenja. Zbog toga su posebno važni kod pretvarača energije morskih valova gdje su opterećenja vrlo promjenjiva. Najčešće korišteni elastomeri su:

- prirodna guma (za sustave za privezivanje i sidrenje, fleksibilna tijela valnih pretvarača, brtvljenje, izolaciju i zaštitu od vibracija)
- EPDM - etilen/propilen/dienski kaučuk (izuzetno izdržljiva sintetička guma, za brtve i spojeve)
- CR - klor-butadienski (kloroprenski) kaučuk (za podvodne spojeve i fleksibilne elemente)
- PUR - poliuretanski kaučuk (za zaštitu od trošenja i fleksibilne spojnice)
- NBR - akrilnitril/butadienski kaučuk (za uljne sustave i hidrauličke instalacije).

4.3. Kompozitni materijali

Primjena kompozitnih materijala u sustavima za iskorištavanje energije mora posljednjih je godina značajno porasla zbog njihove niske gustoće, dobre otpornosti na koroziju i dobrih mehaničkih svojstava. Dok su se u ranim fazama razvoja morskih energetskih sustava uglavnom koristili čelici i druge metalni materijali, suvremeni trendovi usmjereni su prema povećanoj uporabi polimernih kompozita ojačanih staklenim vlaknima (eng. *GFRP - Glass Fibre Reinforced Polymer*) i ugljičnim vlaknima (eng. *CFRP - Carbon Fibre Reinforced Polymer*). Njihova je glavna prednost vrlo visoka specifična čvrstoća.

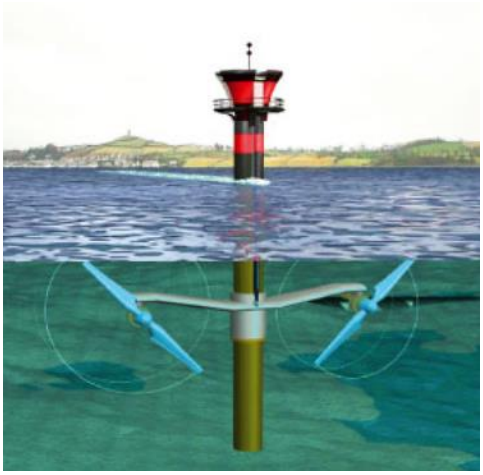
Kompozitni materijali su posebno važni kod plimnih turbina jer značajno smanjuju masu rotora te povećavaju energetsku učinkovitost [8].

Dosadašnja istraživanja su pokazala da kompoziti mogu značajno povećati učinkovitost i trajnost uređaja, ali njihovo ponašanje u morskom okolišu (utjecaj vode, biofouling i opterećenja) još uvijek je predmet intenzivnih istraživanja.

4.3.1. Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima

Kod ove vrste kompozita najčešće matrice su epoksidne, vinilesterske i poliesterske smole. Prednosti su im niska gustoća, otpornost na koroziju, dobra mehanička svojstva i povoljna cijena. Ovisno o vrsti matrice i vlakana te strukturi, vrijednosti vlačne čvrstoće su u rasponu 200 MPa do čak 1000 MPa. Koriste se za izradu lopatica plimnih turbina, plutajućih elemenata, kućišta opreme i dijelova valnih pretvarača [9].

SeaGen S (slika 3.) bio je prvi komercijalni plimni generator velikog kapaciteta priključen na elektroenergetsku mrežu te jedan od najvažnijih demonstracijskih projekata energije plime i oseke u svijetu. Pušten je u pogon 2009. godine u Sjevernoj Irskoj, a prestao s radom 2019. godine. Za izradu lopatica turbina korišteni su kompoziti ojačani staklenim vlaknima, kako bi se osigurala otpornost na koroziju i smanjila inercijska opterećenja rotora. Sustav snage 1200 kW imao je dvostruke rotore s vodoravnom osi postavljene na poprečnu gredu koja se mogla spustiti u vodu na različitim dubinama ili podići radi održavanja [10].



Slika 3. Plimna turbina SeaGen S [10]

4.3.2. Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima

Osim niske gustoće i dobre otpornosti na koroziju, prednosti ovih kompozita su vrlo visoka čvrstoća i izvrsna otpornost na umor materijala. Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima odlikuju se vrlo visokom mehaničkom otpornošću. Ovisno o vrsti vlakana i udjelu armature, njihova vlačna čvrstoća najčešće se kreće između 600 MPa i 2500 MPa, dok kod visokokvalitetnih jednosmjerno ojačanih laminata može biti veća od 3000 MPa. Zbog visoke cijene koriste se kod naprednijih sustava; za visokoučinkovite lopatice turbina, rotacijske dijelove i komponente izložene velikim opterećenjima [11].

Na slici 4. prikazane su turbine plimnih hidroelektrana različitih proizvođača. Postoje horizontalne i vertikalne izvedbe. Lopatice turbina izrađene su od polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima.

Slika 4. Turbine plimnih hidroelektrana:
Oceade (GE/Alstom) (lijevo), Openhydro (u sredini), Kobold (desno) [11]

Posebno zanimljivo područje istraživanja odnosi se na razvoj kompozita ojačanih ugljičnim nanocijevčicama, hibridnih kompozita sa staklenim i ugljičnim vlaknima, reciklabilnih plastomernih kompozita i bio-kompozita proizvedenih iz obnovljivih sirovina. Istraživanja pokazuju da bi upravo napredni kompozitni materijali mogli postati dominantni konstrukcijski materijali u budućim sustavima za iskorištavanje energije mora.

5. Ostali materijali i zaštitni premazi

5.1. Betoni

Za izradu temelja postrojenja, sidrenih blokova, podvodnih potpornih konstrukcija i obalnih energetskih objekata koriste se različite vrste betona. Betonske konstrukcije su visoke tlačne čvrstoće, velike mase koja osigurava stabilnost i relativno niskih troškova. Kako bi se povećala trajnost u morskoj vodi koriste se vodonepropusni betoni, armature otporne na koroziju te bazaltnim, čeličnim ili staklenim vlaknima ojačani betoni visoke mehaničke otpornosti (eng. *UHPC - Ultra High Performance Concrete*).

5.2. Zaštitni premazi

Zaštitni sustavi predstavljaju neizostavan dio gotovo svih morskih energetskih konstrukcija jer bez njih gotovo niti jedan metalni materijal ne može dugoročno izdržati morski okoliš.
Za zaštitu materijala u morskim uvjetima koriste se antikorozivni premazi (temeljni premazi bogati cinkom, epoksidni međupremazi i poliuretanski završni premazi) čija je funkcija stvaranje zaštitne barijere između metala i morske vode.
Također se koriste posebni zaštitni antifouling premazi koji sprječavaju nakupljanje algi, školjki i drugih morskih organizama. Primjenom ovih premaza smanjuje se hidrodinamički otpor i povećava učinkovitost sustava.
Osim spomenutih premaza, za sprječavanje korozije u morskim uvjetima vrlo često se provodi pasivna ili aktivna katodna zaštita.
Suvremena istraživanja usmjerena su prema razvoju grafenskih, keramičkih i nanokompozitnih zaštitnih premaza te tzv. pametnih materijala čija površina neće biti sklona biofoulingu.

6. Zaključak

Unatoč velikom potencijalu energije mora, ona još uvijek nije iskorištena u dovoljnoj mjeri zbog brojnih tehničkih i ekonomskih izazova. Morski uvjeti zahtijevaju pouzdane i dugotrajne tehničke materijale dobrih mehaničkih, korozijskih i drugih svojstava. Pravilan izbor odgovarajućih materijala za izradu pojedinih komponenata omogućuje izgradnju pouzdanih, učinkovitih i dugotrajnih sustava za iskorištavanje energije mora. Daljnja istraživanja i razvoj novih materijala i tehnologija ključni su za smanjenje troškova izgradnje i održavanja ovih sustava, odnosno njihovu ekonomsku isplativost, što je bitan preduvjet za porast iskorištavanja energije mora u budućnosti.

7. Literatura

[1] Strategija Europske unije za iskorištavanje potencijala energije iz obnovljivih izvora na moru za klimatski neutralnu budućnost, Europska komisija, 2020. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:741:FIN&qid=1605792629666

[2] Degiuli, Nastia; Grlj Carlo Giorgio; Martić, Ivana. Sustainable Marine Energy Solutions: Assessing the Renewable Potential of the Adriatic Sea in Croatia. Special Issue Marine Renewable Energy and Environment Evaluation. 2026. https://doi.org/10.3390/jmse14060541

[3] Perčić, Marko. Obnovljivi izvori energije u kontekstu morske tehnologije – sadašnjost i budući trendovi. Pomorski zbornik, Vol. Special edition No. 1, 2016., 213-221. (ISSN 0554-6397), https://doi.org/10.18048/2016-00.213

[4] Kerisel, Jean; Kerisel, Thierry. 1940-1976. Le créateur solitaire: fécondité dans les disciplines les plus diverses. Bulletin de la SABIX, 28/2001 https://journals.openedition.org/sabix/372

[5] Filetin, Tomislav. Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.

[6] Siddiq, M.A.; Rahimi, S.; Huang, J.; Sivaswamy, G. Mechanism-Based Degradation and Structural Integrity of Marine Renewable Energy Systems: Multiscale Modelling, Materials Challenges, and Future Qualification Frameworks. Energies 2026, 19, 2590. https://doi.org/10.3390/en19112590

[7] Filetin, Tomislav; Kovačiček, Franjo; Indof, Janez. Svojstva i primjena materijala, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2007.

[8] Rubino, Felice; Nisticò, Antonio; Tucci, Fausto; Carlone, Pierpaolo. Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. Journal of Marine Science and Engineering. 2020; 8(1):26. https://doi.org/10.3390/jmse8010026

[9] Ascione, Francesco; Leonardi, Alessandro; Maselli, Gabriella; Nesticò, Antonio. Advancing sustainable offshore structures through composites materials: structural and economic analysis. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Volume 209, October 2026, https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2026.110008

[10] "SeaGen-S." Marine Energy Projects Database: Devices https://openei.org/wiki/PRIMRE/Databases/Projects_Database/Devices/_SeaGen-S.

[11] D Satrio, S Musabikha, S Junianto, S Prifiharni, R Kusumastuti, A Nikitasari and G Priyotomo. The Advantages and Challenges of Carbon Fiber Reinforced Polymers for Tidal Current Turbine Systems - An Overview. 2024 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1298 012029. DOI 10.1088/1755-1315/1298/1/012029

Piercing and cutting and piercing and cutting machines

B. Grizelj[1,*], M. Duspara[1], M. Jagnjić[1], P. Jelić[1], M. Lipovac Arelić[1], M. Stoić[1], V. Starčević[1], B. Kovačević[1], S. Suhi[1], M. Vidačić[1]

[1]Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, University of Slavonski Brod, Croatia

[*] Corresponding Author. E-mail: bgrizelj@unisb.hr

Abstract
The paper analyses piercing and cutting and piercing and cutting machines. Influencing factors that affect punching and slitting. During the operation of separating material using tools, the material is separated along a closed contour on machines. In slitting, the core is the workpiece, and the rest of the strip is waste. In punching, the core is the waste, and the rest of the strip is the workpiece. However, depending on the shape of the workpiece and the design of the tool, there are a number of other separation operations, such as cutting off, notching, hole calibration and fine punching.

Key words: machines, piercing, cutting

1. Introduction
Typical material separation operations using press tools are cutting and punching. In these operations, the material is separated along a closed contour. When cutting, the core is the workpiece, and the rest of the strip is scrap, and when punching, the core is pierced, the scrap, and the rest of the strip is the workpiece. However, depending on the shape of the workpiece and the construction of the tool, there are a number of separation operations, such as cutting off, notching, calibrating the opening and fine stamping.

2. Cutting and punching processing process
2.1 Working principle
In the case of a cutting or piercing tool, Figure 1, the material is separated along a closed curve, according to the shape of the workpiece.

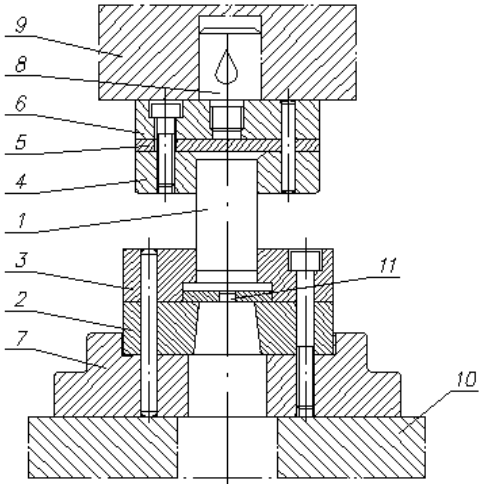


Figure 1. Cutting or piercing tool

The die 1, which is made of alloyed tool steel, is fixed in the mounting plate 4, in such a way that its tip can also be forged (in the case of round dies). In order to increase the surface area that transmits the cutting or piercing force and reduce the surface pressure, the hardened die does not rest directly on the upper plate 6 (made of structural steel), but on the hardened intermediate plate 5. The entire upper tool assembly is most often connected with screws and positioned with cylindrical pins. The upper part of the tool is connected to the press pusher 9 via a clamp 8.

Figure 2 shows the layout of the tools and machine.

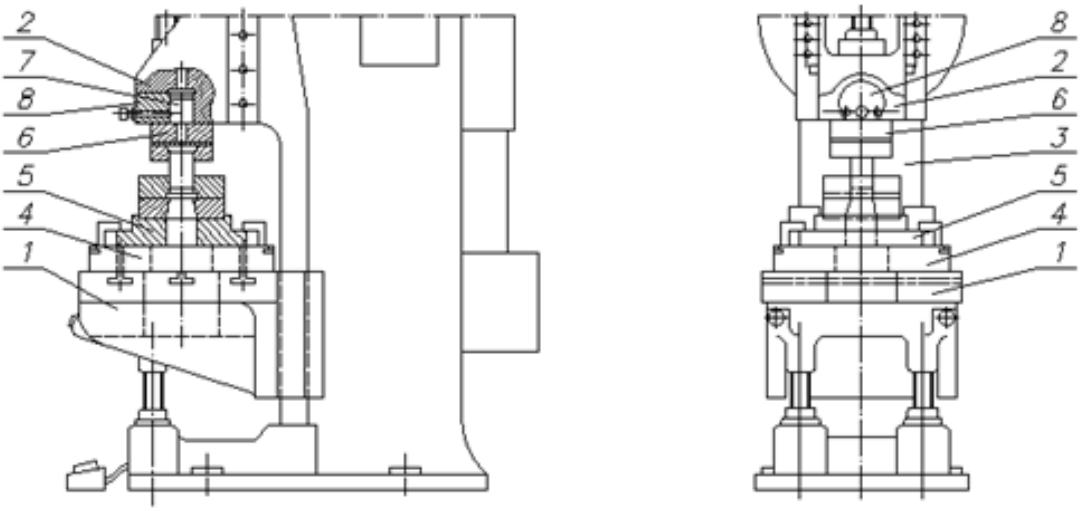


Figure 2 Tool and machine disposition

2.2 Stamping

There are three stages in the punching and cutting (stamping) process Figure 3 [1-3] .

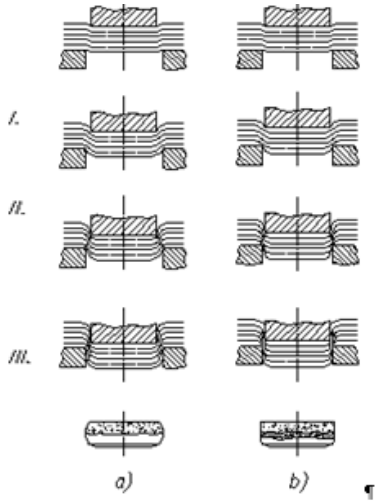


Figure 3. Cutting and piercing phases

At the beginning of the deformation process (phase I), the material is subjected to elastic bending under the pressure of the stamp, which at some point develops into plastic bending, combined with stretching of the fibers. As the stamp penetrates further into the material (phase II), significant deformations occur below the stamp after exceeding the crushing limit. In fact, in this phase the material bends and is pressed into the die opening, so that the force transmitted by the stamp to the material acts on the boundary layer of the material, between the cutting edges of the stamp and the die. These effects of external forces lead to plastic deformation of the layer. The fibers in this phase are not yet broken, although the core is already being pressed. As the stamp penetrates further into the material (phase III), the degree of deformation significantly exceeds the permissible limit. This leads to the formation of the first cracks in front of the cutting edges and the final breakage of the material and the extrusion of the core. The greatest relative depth of stamp penetration $\varepsilon_{ot} = z_{ot} / s$ (Figure 4) (ε_{ot} depth of penetration of the stamp into the material, s material thickness).

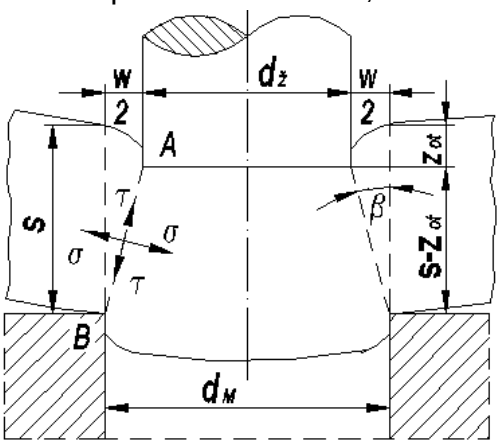


Figure 4. Diagram of the stress state of the material in the third cutting phase (separation phase)

The size of the gap (stamp diameter minus die diameter) also significantly affects the quality of the cut piece (core). With a normal gap, Figure 5., the core is free of burrs (sharp edges). If the gap is smaller than normal, Figure 6., then part of the material is crushed between the cutting edges of the stamp and the cutting die, resulting in a poor-quality core with needle-like burrs, formed from the crushed part of the material.

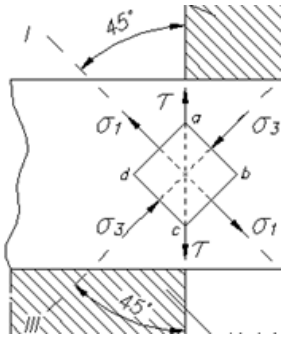
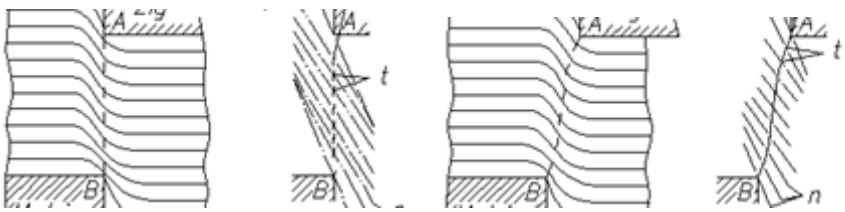


Figure 5. Stress state of the element at the beginning of the deformation in shear

2.3 Stressing phases

The mechanics of the cutting or punching process, and stress analysis in particular, is very important for setting optimal deformation conditions: choosing the necessary size of the gap between the stamp and die for cutting, determining the cutting force, quality of the cut surface, tool life and product accuracy. In theoretical discussions until today, it was exclusively assumed that the process of cutting or piercing, according to the stress classification, belongs to pure shear, which means that there are no normal stresses in the cutting plane σ= 0). More recent research shows that this setting is not correct and that in the cutting plane normal stresses (τ)) occur in addition to tangential stresses (σ). Pure shear, as a stress, exists only when cutting without a gap (w = 0). In the stressed body element *abcd* of Figure 5, normal stresses σ_1= -σ_3 and σ_2=0 occur in the main directions I-I and III-III. The principal normal stresses are equal in absolute value to each other, only in opposite directions (σ_1 - tensile stress, σ_3 - compressive stress). In the cutting plane, which makes an angle of 45° with the principal directions, the greatest tangential stresses (τ)) are present. There are no normal stresses in this plane (σ= 0). Figure 6 shows a diagram of the deformation process without (*a*) and with a gap (*b*).



a without clearance *b* with clearance

Figure 6. Fiber flow and direction of principal tangential (t) and normal (n) stresses

With the penetration of the stamp into the material, fiber compression (under the influence of stress σ_3), stretching (under the influence of σ_1) and simultaneous bending occurs. The

main axes of the deformation are rotated by a certain angle dφ in relation to the initial position. The directions of the main normal stresses (σ) form an angle of 45° with the directions of the greatest tangential stresses (τ). Due to the concentration of stress, the fibers closer to the cutting edges will undergo greater deformation. That is why the angle dφ has the highest values in the material layers immediately next to the cutting edges, and the smallest in the middle.

With the appearance of plastic deformation, the shape of the piece begins to change, resulting in additional stresses. The concept of additional stresses and the cause of their occurrence was defined by S. Gubkin with the law [1] ˝During plastic changes in the shape of layers and elements of a body that tend to increase in size, additional stresses arise that reduce the stresses, and in layers and elements of a body that tend to decrease in size, additional stresses arise that increase the stresses.˝ As a result of the occurrence of additional stresses, the following occurs: an increase in plastic yield stress, a change in the basic stresses, because the additional stresses are added to the basic stress, thus creating working stresses, and a change in the stress scheme of the state of the main stresses caused by external forces. The former can also be visualized by analyzing the stress of the test specimen at the moment of the beginning of the localization of deformation. Due to the local contraction of the test specimen (Figure 7), the elements of the body at the location of localization tend to reduce in size.

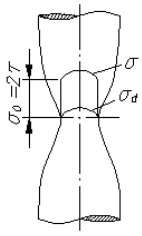


Figure 7. Additional stresses during local contraction of the test tube

Therefore, the basic stress $\sigma_0 = 2\tau$) increases by the amount of the additional stress σ_d, so that the total stress is $\sigma = \sigma_0 + \sigma_d$. The greater the local contraction, the greater the additional stresses. These assumptions were also confirmed by the author of this book in his analyses. Analogously, when cutting or piercing, the material in the cutting zone tends to reduce its dimensions. This causes additional stresses to arise, which increase the basic stresses. By summing the additional and basic stresses, the actual stresses are obtained. This means that the compressive stress will be less than the basic stress in absolute value, and the tensile stress will be greater. Therefore, even under the most favorable conditions of pure shear (cutting without a gap, Figure 6 a), the stress state diagram changes and is somewhere between pure shear and multi-sided stretching.

The stress state of the material in the separation phase can be represented by the diagram in Figure 7.

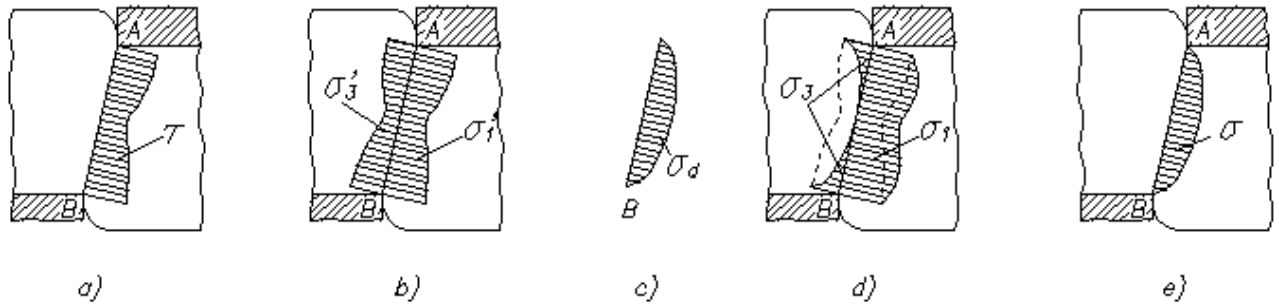


Figure 7. Stress state diagram in the separation phase

3. Force calculation

In calculations used in technical practice, the maximum value of the shear stress or shear strength τ_m is of crucial importance for determining the shearing or piercing force. The shear stress during shearing or piercing is not a constant value, but changes depending on the relative depth of penetration of the stamp according to certain laws, depending on the type of material and the deformation temperature. When cutting or piercing in the cold state, it can be observed that with increasing material hardness, the maximum value of the shear stress (τ_m) also increases, while the relative depth of cutting (ε_{ot}) decreases. When working at elevated temperatures for a given material, the shear strength decreases, and the relative depth of cutting increases with increasing temperature. Analogous conclusions apply to nominal and actual shear stresses as in stretching.

The curve of the dependence of the cutting or piercing force on the absolute depth of penetration of the stamp is shown in Figure 8.

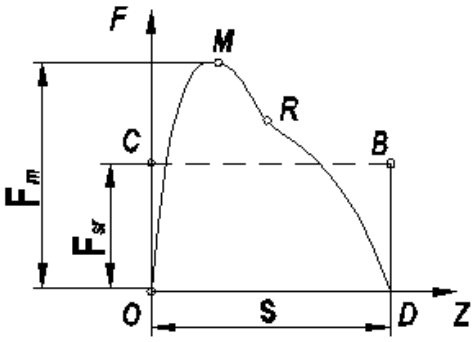


Figure 8. Stamp force depends on the depth of penetration into the material

The cutting and piercing force for tools with parallel cutting edges is determined by the expression:

$$F = L \cdot s \cdot \tau_m, \text{ N}$$

Where is:

L, mm - circumference of the part being cut or pierced or the circumference of the plate

s, mm - material thickness

τ_m, N/mm2- shear strength.

4. Machines

Machines are most often used for stamping:

1. Machines with guaranteed stroke
2. Machines with guaranteed force

4.1 Machines with guaranteed stroke

4.1.1 Classification of presses and types of construction

The group of machines (presses) with a guaranteed path is part of the machines for forming metal by deformation. The classification of machines (presses) with a guaranteed path depends on the operation of the main drive. There are two main groups of these machines:
1. Presses with a crank drive (connecting rod, lever)
2. Presses with a cam mechanism.
Presses with a crank drive are divided into:
I. Presses with a simple action on the drive
II. Presses with an extended crank drive.
Presses with a simple action on the drive:
1. Presses with a crank (the total stroke cannot be changed)
2. Eccentric presses (the total stroke is variable).
Presses with an extended crank drive:
a. Presses with a push crank (lever angle)
b. Presses with a controlled lever
c. double lever driven presses
d. drawing lever driven presses.
Figure 9 shows the diagrams of presses with guaranteed travel (from 1 to 28 the drive is by a crank).

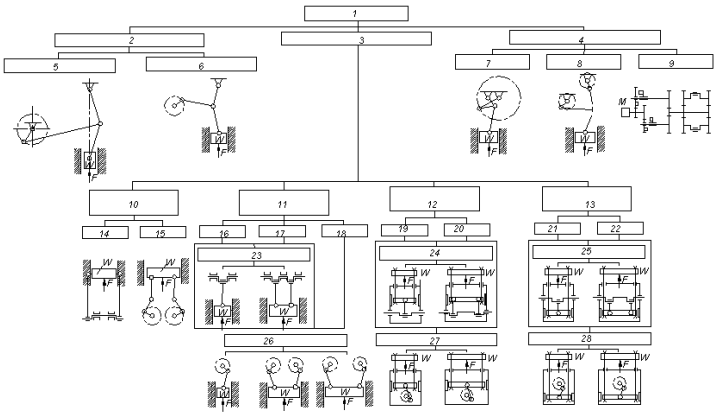


Figure 9. Types of constructions and schemes of presses with a guaranteed path

4.1.2. Machines with guaranteed travel

In machines with guaranteed stroke, the stroke of the machine ram is determined by the kinematics of the main drive. The ram force F_{St} depends on the ram position Figure 10. It can theoretically be infinite. Since in these machines the drive and the press body can withstand the corresponding forces, the nominal force F_N must not be exceeded in these machines.

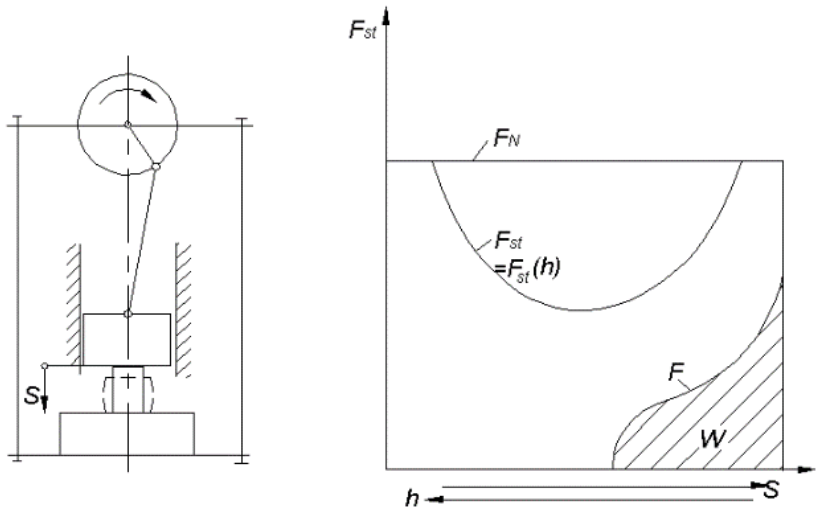
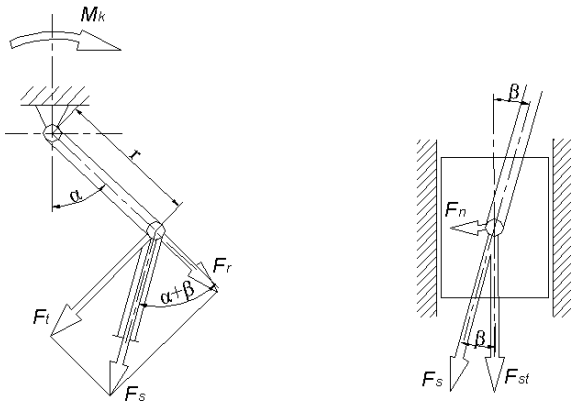


Figure 10 Machines with guaranteed stroke. Crank press (schematic and force limitation)

4.1.3 Force and Moment (with guaranteed travel)

If a torque M_K acts on the knee (connecting rod), the tangential force F_t will act in the connecting rod in the direction of movement, the radial force F_r will act perpendicular to the movement, and the force in the direction of the motor lever F_s will act, Figure 11.



a b

Figure 11. Forces on a crank press: a – connecting rod sleeve; b – motor lever sleeve

For a press, the nominal force F_N and the nominal angle are important α_N, because the press is calculated and dimensioned for the nominal force and nominal angle [2]

$$M_K = F_N \cdot r \cdot \sin \alpha_N$$

$$F_{st} = F_N \cdot \frac{\sin \alpha_N}{\sin \alpha}$$

α_N nominal connecting rod angle corresponding to the nominal force of the press

F_N nominal press force.

Table 1. The most important data of elbow presses

Nominal angle α_N	h_N/H	F_{stmin}/F_N	M_K/M_{K30}	Using
10º	0,008	0,17	0,35	forging in a forge
20º	0,033	0,34	0,68	stamping
30º	0,073	0,50	1,00	universal
45º	0,158	0,71	1,41	extrusion
60º	0,269	0,87	1,73	deep drawing
75º	0,398	0,97	1,93	deep drawing

Figure 12 shows the dependence of F_{st}/F_N on h/H for different α_N.

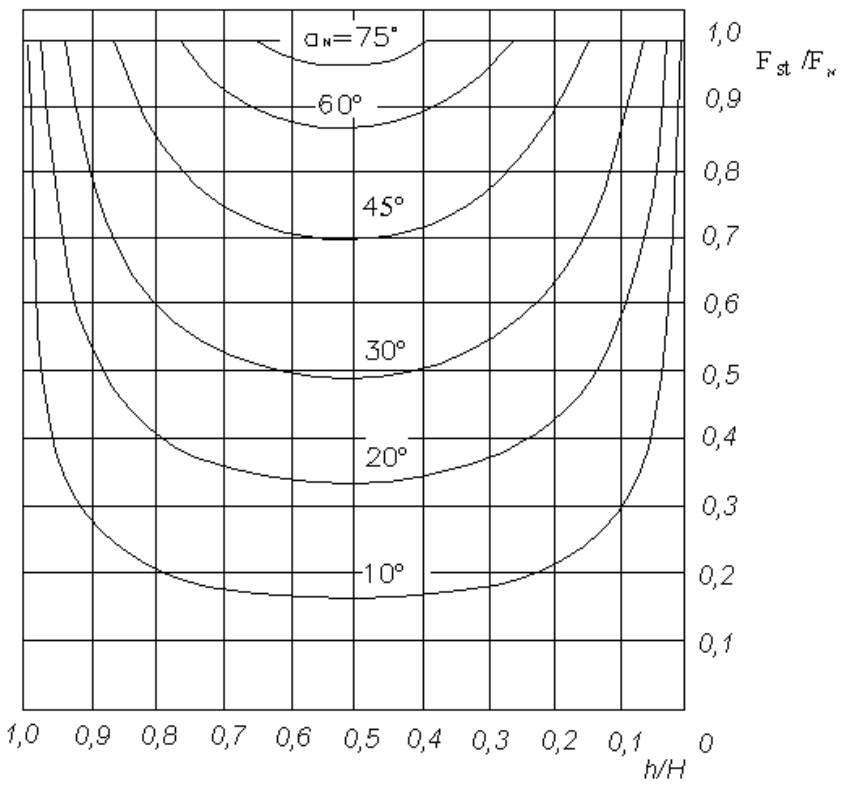


Figure 12. Dependence of F_{st}/F_N on h/H for different

4.2. Machines with guaranteed force

4.2.1 Bernoulli's expression

The possibility of producing a greater force using a pressurized medium has been known since before (Pascal 1662). In 1795, Engler Brahm patented a hydraulic press with a hand-operated pump. In 1860, the Englishman Haswell made a hydraulic water press for free forging. The press was made for Austria.

The production of force and its increase in hydraulic presses is achieved using fluid pressure. For stationary frictionless motion of incompressible fluids along a streamline, the expression according to D. Bernoulli is valid:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = const.$$

Where is:

v_2 /2g-height velocity, m

$p/\rho g$-pressure height, m

z-height of location, m.

For stationary motion of an ideal fluid, the sum of the height velocity, pressure height and height of location is a characteristic and unchanged quantity for each streamline.

Figure 13. shows a simplified diagram of a hydraulic press. In pump 1, mechanical energy is converted into hydraulic energy of the fluid. It flows through lines and appropriate valves to hydraulic cylinder 2, where the hydraulic energy is again converted into mechanical energy.

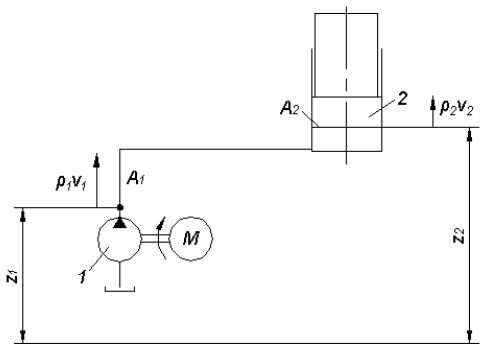


Figure 13. Scheme for deriving the basic expressions of a hydraulic press (1-pump, 2-hydraulic cylinder)

The force is Figure 14:

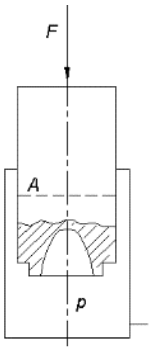


Figure 14. The force
F= p·A

5. Conclusions

The piercing and cutting operation are done using tools on machines. Machines are most often used for stamping: machines with guaranteed stroke and machines with guaranteed force. Machines with a guaranteed stroke are most often used for mass production of sheet metal thicknesses up to 3 mm, α_N=20°. Machines with guaranteed force are used for smaller batches or for sheet thicknesses greater than 3 mm.

When purchasing machinery, it is important to consider what the machine is being purchased for. It is important whether you are purchasing a machine for punching and cutting, forging or deep drawing.

If the nominal force of the punching machine is 10 MN, it is many times cheaper than the same nominal force 10 MN in deep drawing. That is why punching and cutting on a deep drawing machine is not good in production. The price of such parts is many times more expensive.

6. References

[1] Lange, Kurt: Lehrebuch der Umformtechnik Band 1-3 Berlin /Heidelberg/New York: Spring-Verlag, 1972-1975.

[2] Grizelj, Branko: Strojevi za oblikovanje metala deformiranjem Slavonski Brod Strojarski fakultet, 2007 (sveučilišni udžbenik).

[3] Grizelj, Branko: Alati i naprave Slavonski Brod Strojarski fakultet, 2002 (sveučilišni udžbenik).

Kontrola kvalitete polimernih kalupa za injekcijsko prešanje polimera izrađenih aditivnim tehnologijama
Quality Control of Polymer Injection Moulds Manufactured by Additive Technologies

A. Jurša[1], J. Groš[1,*], P. Raos[2], J. Stojšić[2]

[1]Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, 10000 Zagreb, Hrvatska

[2]Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Ulica 108. brigade ZNG 36, 35000 Slavonski Brod, Hrvatska

[*]Autor za korespodenciju. E-mail: jgros@tvz.hr

Sažetak

U radu je prikazana primjena optičkog trodimenzionalnog mjernog sustava u kontroli kvalitete polimernog kalupa za injekcijsko prešanje izrađenog aditivnom tehnologijom. Geometrija ispitivanog kalupa digitalizirana je uređajem Steinbichler Comet L3D, dok su obrada mjernih podataka i analiza odstupanja provedene u programskim sustavima collin3D i ZEISS Inspect Optical 3D. Analiziran je kalup izrađen SLS postupkom koji je naknadno površinski obrađen postupkom elektroplatiniranja. Rezultati su prikazani kroz površinsku analizu odstupanja, analizu presjeka te kontrolu karakterističnih geometrijskih značajki. Dobiveni rezultati potvrđuju mogućnost učinkovite primjene optičkog trodimenzionalnog mjerenja u kontroli kvalitete aditivno proizvedenih polimernih kalupa.

Ključne riječi: kontrola kvalitete, optička metrologija, aditivna proizvodnja, polimerni kalupi, trodimenzionalna digitalizacija.

Abstract

The paper presents the application of an optical three-dimensional measurement system in the quality control of a polymer injection mould manufactured using additive technology. The geometry of the tested mould was digitised using the Steinbichler Comet L3D device, while measurement data processing and deviation analysis were carried out using the collin3D and ZEISS Inspect Optical 3D software systems. The mold made by the SLS process, which was subsequently surface-treated by the electroplating process, was analyzed. The results are presented through surface deviation analysis, cross-section analysis, and verification of characteristic geometric features. The obtained results confirm the possibility of effective application of optical three-dimensional measurement in the quality control of additively manufactured polymer moulds.

Key words: quality control, optical metrology, additive manufacturing, polymer molds, three-dimensional digitization.

1. Uvod

Kontrola kvalitete važan je dio suvremenih proizvodnih procesa jer omogućuje provjeru usklađenosti proizvoda s definiranim tehničkim zahtjevima te osigurava funkcionalnost i dimenzijsku točnost konačnog proizvoda. Razvojem aditivnih tehnologija proizvodnje raste potreba za primjenom pouzdanih metoda mjerenja koje omogućuju brzu i preciznu analizu geometrijskih značajki proizvedenih dijelova. Polimerni kalupi za injekcijsko prešanje izrađeni aditivnim tehnologijama omogućuju brzu i ekonomičnu izradu alata složene geometrije. Međutim, zbog specifičnosti procesa izrade mogu se pojaviti geometrijska odstupanja koja utječu na kvalitetu i funkcionalnost kalupa. Zbog toga je potrebno provesti kontrolu kvalitete primjenom odgovarajućih mjernih metoda. U ovom radu analiziran je polimerni kalup za injekcijsko prešanje izrađen tehnologijom SLS (Selective Laser Sintering) i naknadno površinski obrađen postupkom elektroplatiniranja. Geometrija kalupa digitalizirana je optičkim trodimenzionalnim mjernim sustavom Steinbichler Comet L3D, dok su obrada podataka i analiza odstupanja provedene korištenjem programskih sustava collin3D i ZEISS Inspect Optical 3D. Cilj rada je ispitati mogućnosti primjene optičkog trodimenzionalnog mjerenja u kontroli kvalitete aditivno proizvedenih polimernih kalupa te analizirati odstupanja između stvarne i nominalne geometrije. Rezultati su prikazani kroz površinsku analizu odstupanja, analizu presjeka i dimenzijsku kontrolu karakterističnih geometrijskih značajki.

2. Optički beskontaktni mjerni uređaj

Za digitalizaciju geometrije ispitivanog kalupa korišten je optički trodimenzionalni mjerni sustav Steinbichler Comet L3D. Na Sl.1. prikazan je Steinbichler Comet L3D mjerni uređaj.

Slika 1. *Steinbichler Comet L3D*

Sustav se temelji na metodi strukturiranog svjetla te omogućuje brzo i precizno beskontaktno mjerenje složenih geometrijskih oblika. Tijekom mjerenja projektor projicira svjetlosne uzorke na površinu objekta, dok kamera bilježi njihovu deformaciju uzrokovanu geometrijom promatrane površine. Određivanje prostornih koordinata točaka temelji se na principu triangulacije, pri čemu se na temelju poznatog geometrijskog odnosa između projektora i kamere rekonstruira trodimenzionalni oblik objekta. Rezultat mjerenja je oblak točaka koji se daljnjom obradom pretvara u poligonalni model pogodan za analizu i kontrolu kvalitete. Primjena optičkog mjernog sustava posebno je pogodna za kontrolu dijelova izrađenih aditivnim tehnologijama jer omogućuje brzo prikupljanje velikog broja mjernih podataka bez kontakta s površinom ispitivanog objekta. U ovom radu digitalizirani podaci korišteni su za usporedbu stvarne geometrije kalupa s referentnim CAD modelom te za analizu geometrijskih odstupanja.

3. Programski paketi za kontrolu kvalitete

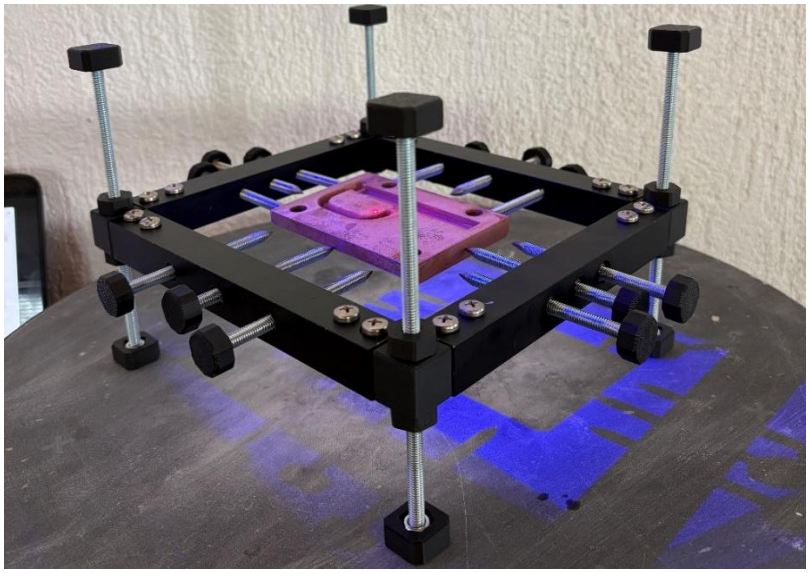
Za obradu mjernih podataka i analizu geometrijskih odstupanja korišteni su programski sustavi collin3D i ZEISS Inspect Optical 3D. Programski sustav collin3D korišten je za upravljanje procesom digitalizacije, obradu pojedinačnih snimaka te generiranje poligonalnog modela mjerenog objekta. Nakon završene digitalizacije, podaci su izvezeni u STL format i pripremljeni za daljnju analizu. Analiza geometrijske točnosti provedena je u programskom sustavu ZEISS Inspect Optical 3D. Softver omogućuje poravnanje digitaliziranog modela s referentnim CAD modelom te provođenje različitih postupaka kontrole kvalitete, uključujući površinsku analizu odstupanja, analizu presjeka i dimenzijsku kontrolu karakterističnih geometrijskih značajki. Rezultati analize prikazani su numerički, čime je omogućena procjena geometrijske točnosti ispitivanog kalupa. Primjenom navedenih programskih alata uspostavljen je cjelovit postupak kontrole kvalitete, od prikupljanja mjernih podataka do analize odstupanja između stvarne i nominalne geometrije kalupa.

4. Mjerenje polimernog kalupa

Ispitivanje je provedeno na polimernom kalupu za injekcijsko prešanje izrađenom aditivnom tehnologijom SLS (Selective Laser Sintering) i naknadno površinski obrađenim postupkom elektroplatiniranja. Polimerni kalup izrađen SLS tehnologijom prikazan je na Sl. 2.

Slika 2. *Polimerni kalup izrađen SLS tehnologijom*

Geometrija kalupa digitalizirana je optičkim trodimenzionalnim mjernim sustavom Steinbichler Comet L3D. Prije mjerenja kalup je pripremljen za digitalizaciju te postavljen u odgovarajući položaj unutar mjernog volumena sustava. Budući da jednom snimkom nije moguće obuhvatiti cjelokupnu geometriju kalupa, provedeno je više snimanja iz različitih orijentacija, čime je osigurano potpuno prikupljanje mjernih podataka. Kako bi se osigurala ponovljivost i stabilnost mjerenja, korištena je posebno izrađena konstrukcija za pozicioniranje kalupa tijekom procesa digitalizacije. Mjerenje kalupa u konstrukciji prikazano je na Sl. 3.



Slika 3. *Mjerenje kalupa optičkim 3D mjernim sustavom*

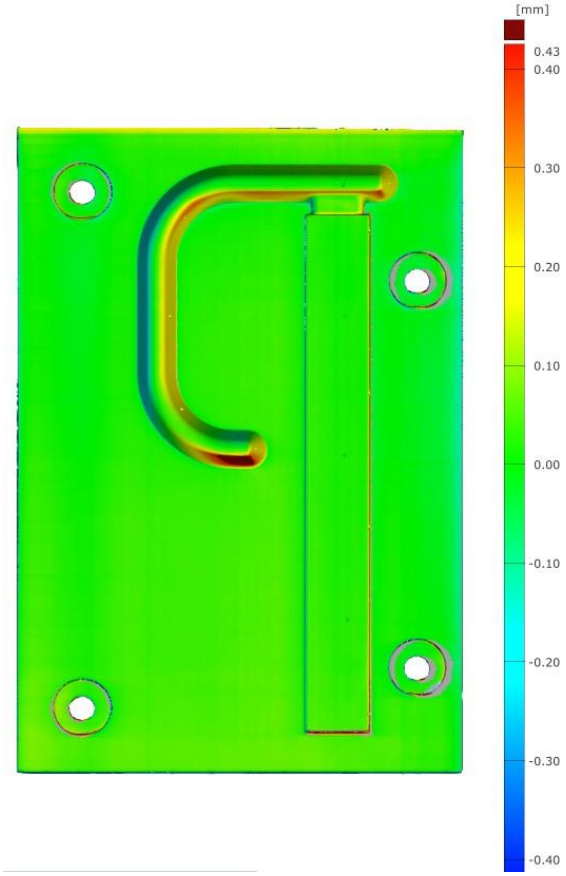
Nakon digitalizacije pojedinačne snimke spojene su u jedinstveni poligonalni model koji predstavlja stvarnu geometriju ispitivanog kalupa. Dobiveni model zatim je uvezen u programski sustav ZEISS Inspect Optical 3D, gdje je provedeno poravnanje s referentnim CAD modelom te priprema za analizu odstupanja.

5. Analiza kontrole kvalitete

Nakon poravnanja digitaliziranog modela s pripadajućim CAD modelom provedena je površinska analiza odstupanja korištenjem programskog sustava ZEISS Inspect Optical 3D. Analiza je provedena metodom usporedbe površina, pri čemu je za svaku točku digitaliziranog modela određeno odstupanje u odnosu na nominalnu geometriju.

5.1. Površinska analiza odstupanja

Rezultati površinske analize prikazani su u obliku kolor mape odstupanja, koja omogućuje vizualnu identifikaciju područja s najvećim pozitivnim i negativnim odstupanjima. Zelena područja predstavljaju dijelove kalupa čija se geometrija nalazi unutar zadane tolerancije od ±0,10 mm, dok plava i crvena područja ukazuju na negativna, odnosno pozitivna odstupanja od nominalnog CAD modela. Površinska analiza odstupanja prikazana je na Sl. 4.

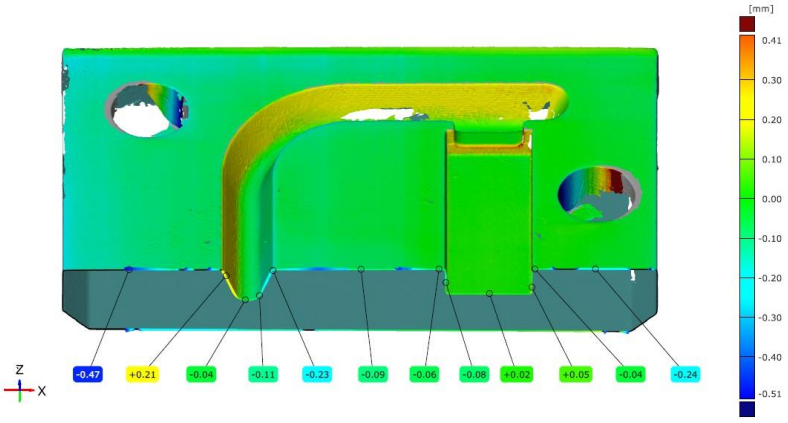


Slika 4. *Površinska analiza odstupanja između digitaliziranog i CAD modela*

Kvantitativnom analizom površinskih odstupanja utvrđeno je minimalno odstupanje od −0,60 mm i maksimalno odstupanje od +0,60 mm, dok aritmetička sredina odstupanja iznosi -0,05 mm. Dobivene vrijednosti nadopunjuju kvalitativnu interpretaciju kolor mape te omogućuju objektivniju procjenu geometrijske točnosti analiziranog kalupa. Najizraženija odstupanja lokalizirana su na rubnim dijelovima i područjima složenije geometrije, dok je na većem dijelu površine vidljiva bolja podudarnost s nominalnim CAD modelom.

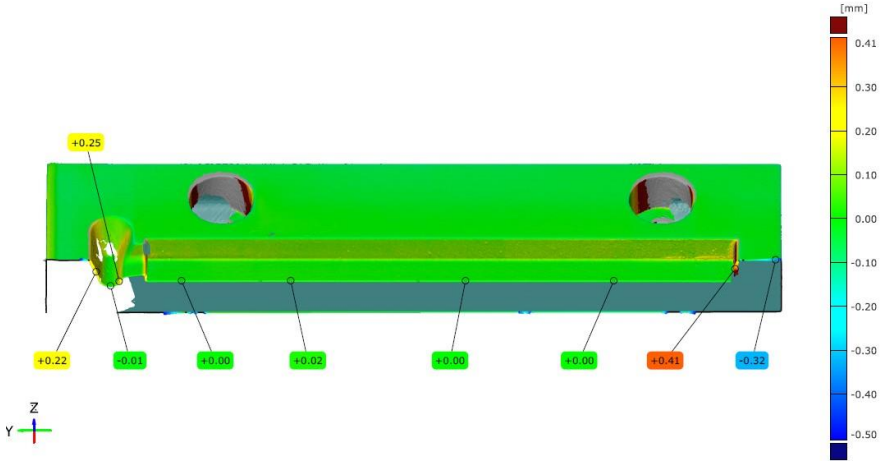
5.2. Analiza presjeka po X i Y osima

Kako bi se detaljnije analizirala geometrijska točnost ispitivanog kalupa, provedena je analiza presjeka po X i Y osima. Presjeci omogućuju usporedbu stvarnog oblika digitaliziranog modela s nominalnom geometrijom te pružaju uvid u lokalna odstupanja koja nisu uvijek jasno vidljiva na površinskoj analizi odstupanja. Presjeci su definirani kroz karakteristične dijelove kalupa koji sadrže funkcionalno važne geometrijske značajke. Sl. 5. prikazuje analizu presjeka po X osi.



Slika 5. *Analiza presjeka po X osi*

Analizom presjeka po X osi utvrđena je dobra podudarnost između digitaliziranog i nominalnog modela na većem dijelu promatranog područja. Uočena odstupanja uglavnom su lokalnog karaktera te su izraženija na rubnim dijelovima i prijelazima između geometrijskih značajki. Takva odstupanja mogu se povezati s karakteristikama procesa aditivne proizvodnje. Sl. 6. prikazuje analizu presjeka po Y osi.



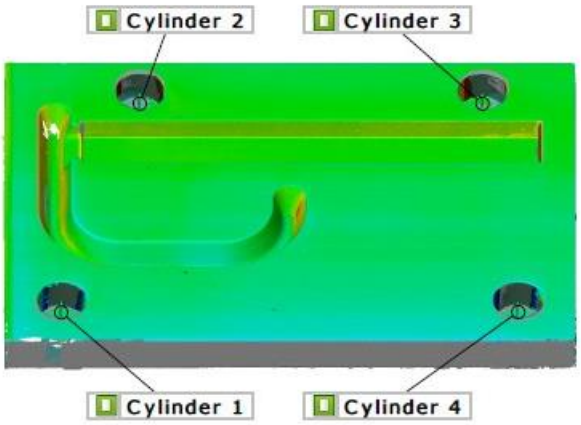
Slika 6. *Analiza presjeka po Y osi*

Rezultati analize presjeka po Y osi pokazuju slična odstupanja. Najveća odstupanja zabilježena su na područjima složenije geometrije, dok je u središnjim dijelovima kalupa ostvarena vrlo dobra podudarnost s referentnim CAD modelom. Dobiveni rezultati potvrđuju da analizirani kalup u najvećoj mjeri zadržava projektiranu geometriju te da su odstupanja ograničena na pojedina lokalna područja.

5.3. Analiza montažnih provrta

Montažni provrti predstavljaju jednu od funkcionalno najvažnijih geometrijskih značajki analiziranog kalupa jer izravno utječu na njegovu montažu, pozicioniranje i uporabu tijekom procesa injekcijskog prešanja. Zbog toga je provedena dimenzijska kontrola promjera provrta usporedbom izmjerenih vrijednosti s nominalnim vrijednostima definiranim CAD modelom. Analiza je provedena korištenjem funkcija za dimenzijsku kontrolu unutar programskog sustava ZEISS Inspect Optical 3D. Za svaki provrt određeni su središte,

promjer i odstupanje od nominalne vrijednosti, čime je omogućena procjena njihove geometrijske točnosti. Analiza i montažni provrti su prikazani na Sl. 7.



Slika 7. *Analiza i numerizacija montažnih provrta*

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici u nastavku (Tab. 1), gdje su uspoređene nominalne i izmjerene vrijednosti promjera pojedinih provrta.

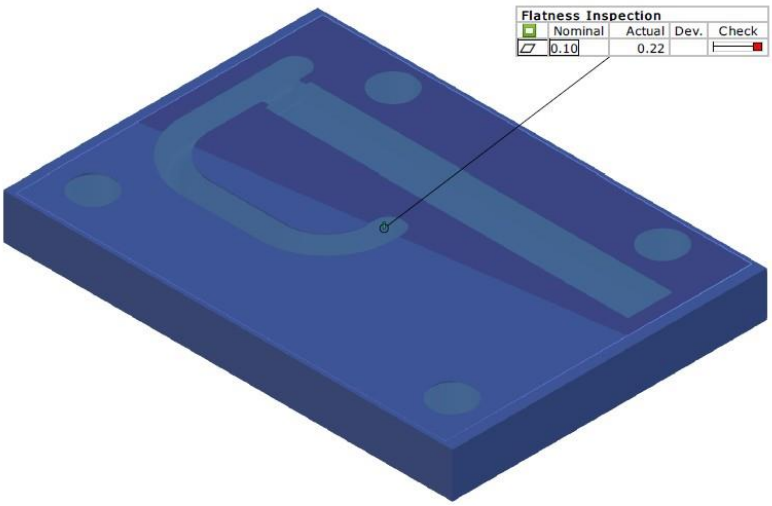
Tablica 1. Nominalne i izmjerene vrijednosti provrta

Provrt	Nominalni promjer [mm]	Izmjereni promjer [mm]	Odstupanje [mm]	Tolerancija [mm]
1	9,00	8,70	-0,30	±0,10
2	9,00	8,65	-0,35	±0,10
3	9,00	8,73	-0,27	±0,10
4	9,00	8,74	-0,26	±0,10

Analizom rezultata utvrđeno je da su izmjereni promjeri svih četiriju montažnih provrta manji od nominalne vrijednosti od 9,00 mm. Odstupanja iznose od −0,26 mm do −0,35 mm te svi analizirani provrti izlaze izvan zadane tolerancije od ±0,10 mm. Prema tome, zahtjev dimenzijske točnosti montažnih provrta nije zadovoljen. Negativna odstupanja svih četiriju provrta upućuju na smanjenje njihovih promjera u odnosu na nominalnu geometriju. Takva odstupanja mogu otežati ili onemogućiti pravilnu montažu i pozicioniranje kalupa ako su za njegovu ugradnju potrebni elementi dimenzionirani prema nominalnom promjeru provrta. Stoga je prije funkcionalne primjene kalupa potrebno provjeriti mogućnost montaže te, prema potrebi, provesti naknadnu obradu provrta radi postizanja zahtijevanih dimenzija.

5.4. Analiza ravnosti površine

Osim površinske analize odstupanja i dimenzijske kontrole karakterističnih značajki, provedena je i analiza ravnosti odabrane referentne površine kalupa. Ravnost predstavlja važan geometrijski parametar jer može utjecati na pravilno pozicioniranje i funkcionalnost kalupa tijekom uporabe. Analiza je provedena određivanjem najbolje prilagođene ravnine na promatranoj površini te izračunom odstupanja pojedinih točaka u odnosu na referentnu ravninu. Na taj je način omogućena procjena deformacija i lokalnih nepravilnosti promatrane površine. Na Sl. 8 prikazan je rezultat analize ravnosti odabrane površine kalupa.



Slika 8. *Analiza ravnosti površine kalupa*

Analizom ravnosti utvrđeno je odstupanje od 0,22 mm, dok zadana tolerancija ravnosti iznosi 0,10 mm. Dobivena vrijednost premašuje dopuštenu toleranciju za 0,12 mm, odnosno izmjerena ravnost je 2,2 puta veća od dopuštene vrijednosti. Prema tome, analizirana površina ne zadovoljava postavljeni zahtjev ravnosti. Najizraženija odstupanja uočena su na rubnim dijelovima promatrane površine, dok su u središnjem području odstupanja manja. Nezadovoljavajuća ravnost referentne površine može negativno utjecati na pravilno nalijeganje i pozicioniranje kalupa tijekom montaže i uporabe. Budući da funkcionalno ispitivanje kalupa nije provedeno, na temelju rezultata mjerenja nije moguće utvrditi stvarni opseg tog utjecaja, ali dobiveno odstupanje ukazuje na potrebu za dodatnom provjerom ili naknadnom obradom referentne površine prije primjene kalupa.

5.5. Rasprava rezultata

Provedena analiza pokazala je da optičko trodimenzionalno mjerenje omogućuje detaljnu kontrolu geometrijske točnosti analiziranog polimernog kalupa izrađenog SLS tehnologijom. Kombinacijom površinske analize odstupanja, analize presjeka, dimenzijske kontrole montažnih provrta i analize ravnosti dobiven je uvid u globalna i lokalna odstupanja stvarne geometrije kalupa u odnosu na nominalni CAD model. Rezultati površinske analize pokazali su da odstupanja nisu jednoliko raspoređena po cijeloj površini kalupa. Aritmetička sredina površinskih odstupanja iznosi −0,05 mm, što upućuje na blago negativno prosječno odstupanje u odnosu na nominalnu geometriju. Najizraženija odstupanja uočena su na rubnim dijelovima i područjima složenije geometrije. Analiza presjeka po osima X i Y dodatno je potvrdila lokalni karakter izraženijih odstupanja te bolju podudarnost digitaliziranog i nominalnog modela na ostalim promatranim područjima. Dimenzijska kontrola montažnih provrta pokazala je sustavno negativno odstupanje njihovih promjera u odnosu na nominalnu vrijednost. Sva četiri analizirana provrta imaju odstupanja od −0,26 mm do −0,35 mm i nalaze se izvan zadane tolerancije od ±0,10 mm. Stoga zahtjev dimenzijske točnosti montažnih provrta nije zadovoljen. Smanjeni promjeri mogu otežati pravilnu montažu i pozicioniranje kalupa te mogu zahtijevati naknadnu obradu provrta prije njegove funkcionalne primjene. Analizom ravnosti referentne površine utvrđena je vrijednost od 0,22 mm, što premašuje zadanu toleranciju od 0,10 mm. Zahtjev ravnosti analizirane površine stoga nije zadovoljen. Odstupanje ravnosti može utjecati na pravilno nalijeganje i pozicioniranje kalupa, zbog čega je prije njegove primjene potrebno razmotriti dodatnu kontrolu ili naknadnu obradu referentne površine.

Tablica 2. Zaključna tablica i rezultati analize

Analiza	Rezultat	Zaključak
Površinska usporedba	Većina površine unutar ±0,1 mm	Zadovoljava
X i Y presjeci	Lokalna odstupanja na rubovima i utorima	Očekivano
Montažni provrti	-0,26 do -0,35 mm	Ne zadovoljava
Ravnost površine	0,22 mm (tol. 0,10 mm)	Ne zadovoljava

Dobiveni rezultati pokazuju da se geometrijska kvaliteta analiziranog kalupa ne može procijeniti isključivo na temelju opće podudarnosti površine s CAD modelom. Iako površinska analiza i analiza presjeka pokazuju dobru podudarnost na pojedinim područjima kalupa, kontrola funkcionalno važnih geometrijskih značajki pokazala je odstupanja izvan zadanih tolerancija kod montažnih provrta i ravnosti referentne površine. Time se potvrđuje važnost kombiniranja površinske analize s pojedinačnom dimenzijskom i geometrijskom kontrolom funkcionalno važnih značajki.

5. Zaključak

U radu je provedena kontrola kvalitete polimernog kalupa za injekcijsko prešanje izrađenog SLS aditivnom tehnologijom primjenom optičkog trodimenzionalnog mjernog sustava Steinbichler Comet L3D. Dobiveni mjerni podaci obrađeni su u programskim sustavima collin3D i ZEISS Inspect Optical 3D, čime je omogućena usporedba stvarne i nominalne geometrije analiziranog kalupa. Provedene analize površinskih odstupanja i presjeka pokazale su dobru podudarnost na većem dijelu promatrane geometrije, uz lokalno izraženija odstupanja na rubnim i geometrijski složenijim područjima. Dimenzijska kontrola montažnih provrta pokazala je odstupanja od −0,26 mm do −0,35 mm, čime zadana tolerancija od ±0,10 mm nije zadovoljena. Također, izmjerena ravnost površine od 0,22 mm premašuje dopuštenu toleranciju od 0,10 mm. Dobiveni rezultati pokazuju da opća podudarnost površine s nominalnim modelom ne podrazumijeva nužno zadovoljavanje zahtjeva pojedinih funkcionalno važnih geometrijskih značajki. Primjena optičkog trodimenzionalnog mjerenja pokazala se kao učinkovita metoda za kontrolu kvalitete i identifikaciju geometrijskih odstupanja aditivno proizvedenog polimernog kalupa.

6. Literatura

[1] G. Taubin, D. Moreno, D. Lanman, „3D Scanning with Structured Light“, dostupno na: http://mesh.brown.edu/desktop3dscan/ch5-structured.html
[2] J. Geng, „Advances in Optics and Photonics“, Optica Publishing Group, dostupno na: https://opg.optica.org/aop/fulltext.cfm?uri=aop-3-2-128
[3] „Dimensioning and Tolerancing“, ASME Y14.5, dostupno na: Dimensioning and Tolerancing
[4] G. Pelin, M. Sonmez, C. E. Pelin, „The Use of Additive Manufacturing Techniques in the Development of Polymeric Molds: A Review“, dostupno na: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11054453/
[5] A. B. Lozano, S. H. Álvarez, C. V. Isaza, W. Montealegre-Rubio, „Analysis and Advances in Additive Manufacturing as a New Technology to Make Polymer Injection Molds for World-Class Production Systems“, dostupno na: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9105666/
[6] T. L. Leirmo, O. Semeniuta, „Investigating the Dimensional and Geometric Accuracy of Laser-Based Powder Bed Fusion of PA2200 (PA12): Experiment Design and Execution“, dostupno na: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/5/2031

Research conducted using equipment from the project: “***Analysis of Surface Parameters of Metal Coatings Applied to Polymer Products Manufactured by Additive Technology Using Computer Vision***“ (APPMPPTRV) – NPOO2024-2

Analysis of the Influence of Infill Density and Infill Geometry on the Tensile Strength of PLA Structures Filled with Photopolymer Resin

L. Brčić, I. Grgić[1], J. Marijić[1,*], M. Karakašić[1], M. K. H. Nabil[2]
[1]University of Slavonski Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, Slavonski Brod, Croatia
[2]Department of Information and Communication Technology, Bangladesh University of Professionals, Dhaka 1216, Bangladesh

[*]Corresponding author. E-mail: jmarijic@unisb.hr

Abstract
Hybrid additive manufacturing provides opportunities to combine materials and manufacturing processes to tailor the mechanical performance of additively manufactured structures. However, the relationship between the internal architecture of FDM-fabricated structures and the mechanical response of resin-filled hybrid components remains insufficiently investigated. This study investigates the effects of infill density and infill geometry on the tensile strength of FDM-fabricated PLA structures whose internal cells were subsequently filled with photopolymer resin. Three infill densities (12.5%, 25%, and 50%) and three infill geometries (Grid, Triangle, and Tri-Hexagon) were investigated using three replicates for each parameter combination. The highest average tensile strength of 22.25 MPa was obtained for the Grid pattern at 25% infill density, whereas the lowest value of 12.70 MPa was recorded for the Tri-Hexagon pattern at 50% infill density. Increasing the infill density to 50% did not improve tensile strength and was associated with more difficult resin filling due to the reduced dimensions of the infill cells. Examination of the fracture surfaces revealed porosity and cavities within the resin-filled regions, particularly in structures with smaller and more complex cells, indicating that filling quality strongly affects the mechanical response of the hybrid structures. The results identify infill architecture and resin-filling quality as important parameters in the design of PLA–photopolymer hybrid structures and demonstrate the need for further optimization of the filling process to achieve more homogeneous structures and improved mechanical performance.

Key words: FDM Technology; PLA; Photopolymer Resin; Tensile Strength; Infill Structure.

1. Introduction

Additive manufacturing (AM) enables the fabrication of components with complex geometries and a high degree of design flexibility while reducing material waste compared with conventional manufacturing processes [1,2]. Among the available AM technologies, Fused Deposition Modeling (FDM) is widely used due to its relatively low cost, accessibility, and broad range of thermoplastic materials [3]. However, the mechanical performance of

FDM-manufactured components is strongly dependent on process and design parameters, including build orientation, layer thickness, infill density, and infill geometry [4].

Polylactic acid (PLA) is one of the most commonly used materials in FDM because of its ease of processing, dimensional stability, and low susceptibility to warping [5]. The mechanical behavior of FDM-manufactured PLA components is strongly influenced by their internal architecture. In particular, infill density determines the amount and distribution of material within the component, whereas infill geometry affects stress distribution and load transfer through the internal structure. Previous studies have demonstrated that these parameters can substantially influence the mechanical properties of FDM-manufactured components [4,6].

In addition to optimizing conventional FDM process parameters, hybrid manufacturing approaches provide an alternative strategy for modifying the mechanical behavior of additively manufactured structures [8]. One such approach is the combination of an FDM-manufactured thermoplastic framework with a secondary material introduced into its internal cells. Photopolymer resins are suitable candidates for this purpose because they can be introduced in liquid form into the internal structure and subsequently solidified by ultraviolet (UV) radiation [7]. This enables the fabrication of a hybrid structure consisting of an FDM-manufactured PLA framework and cured photopolymer resin occupying the internal infill cells.

Despite increasing interest in hybrid additive manufacturing, the relationship between FDM infill architecture and the mechanical response of subsequently resin-filled structures remains insufficiently investigated. In particular, limited information is available on how different combinations of infill density and infill geometry affect the tensile strength and resin-filling quality of PLA–photopolymer hybrid structures. The geometry and dimensions of the internal cells may affect not only load transfer but also the ability of liquid resin to completely fill the available volume, potentially leading to porosity and cavities that influence the resulting mechanical behavior.

Therefore, the objective of this study is to investigate the effects of infill density and infill geometry on the tensile strength of FDM-manufactured PLA structures subsequently filled with photopolymer resin. Three infill densities (12.5%, 25%, and 50%) and three infill geometries (Grid, Triangle, and Tri-Hexagon) are investigated. Particular attention is given to identifying the parameter combination associated with the highest tensile strength and to examining the relationship between infill architecture, resin-filling quality, and observed fracture behavior. The study thus evaluates the feasibility and limitations of the proposed hybrid manufacturing approach and provides a basis for further optimization of resin-filled FDM structures.

2. Materials and Methods

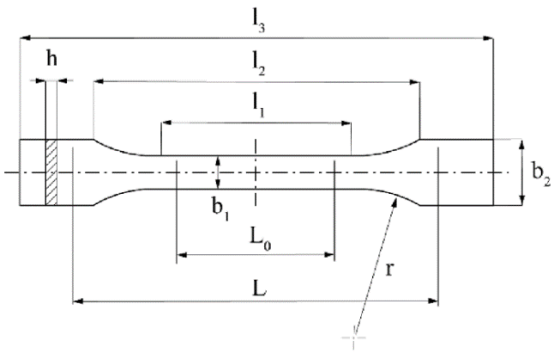
2.1. Experimental Design

A full factorial experimental design was employed to investigate the effects of infill density and infill geometry on the tensile strength of the resin-filled PLA structures [9]. Two factors were considered, each at three levels: infill density at 12.5%, 25%, and 50%, and infill geometry represented by Grid, Triangle, and Tri-Hexagon patterns. The resulting 3^2 factorial

design comprised nine experimental combinations. Three independent specimens were manufactured and tested for each combination, resulting in a total of 27 specimens.
The use of three replicates per experimental condition enabled estimation of experimental variability and statistical evaluation of the investigated factors. The tensile strength was considered the response variable. The effects of infill density, infill geometry, and their interaction on tensile strength were evaluated using two-way analysis of variance (ANOVA) at a significance level of α = 0.05. Experimental results are reported as mean values and standard deviations for each parameter combination.

2.2. Materials and Specimen Fabrication

Tensile test specimens were designed in accordance with the standardized geometry adopted for the experimental investigation. The specimen geometry and the corresponding dimensions used in this study are presented in Figure 1. The same external geometry was maintained for all specimens, while the internal structure was varied according to the selected infill density and infill geometry defined in the experimental design.



	Specimen type	1A	1B
l_3	Overall length[a]	170	≥150
l_1	Length of narrow parallel-sided portion	80 ± 2	60,0 ± 0,5
r	Radius	24 ± 1	60 ± 0,5
l_2	Distance between broad parallel-sided portions [b]	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
b_2	Width at ends	20,0 ± 0,2	
b_1	Width at narrow portion	10,0 ± 0,2	
h	Preferred thickness	4,0 ± 0,2	
L_0	Gauge length (preferred)	75,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
	Gauge length (acceptable if required for quality control or when specified)	50,0 ± 0,5	
L	Initial distance between grips	115 ± 1	115 ± 1

[a] The recommended overall length of 170 mm of the type 1A is consistent with ISO 294-1 and ISO 10724-1. For some materials, the length of the tabs may need to be extended (e.g. l_3 = 200 mm) to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.

[b] $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, resulting from l_1, r, b_1 and b_2, but within the indicated tolerances.

Figure 1. Test Specimen Geometry According to the ISO 527-2 Standard.

The specimens were manufactured from PLA using a Bambu Lab A1 Mini FDM 3D printer equipped with a 0.4 mm nozzle. A layer height of 0.20 mm, nozzle temperature of 220 °C, and build plate temperature of 65 °C were used for all specimens. The remaining printing parameters were kept constant throughout the experiment to ensure consistent manufacturing conditions.
To enable subsequent filling with photopolymer resin, the Top Shell Layers and Bottom Shell Layers were set to zero. Consequently, the internal infill cells remained accessible from both sides of the specimens after printing.
Three infill geometries were investigated: Grid, Triangle, and Tri-Hexagon (Figure 2). For each geometry, three infill densities were considered: 12.5%, 25%, and 50%, resulting in nine parameter combinations according to the experimental design described in Section 2.1.

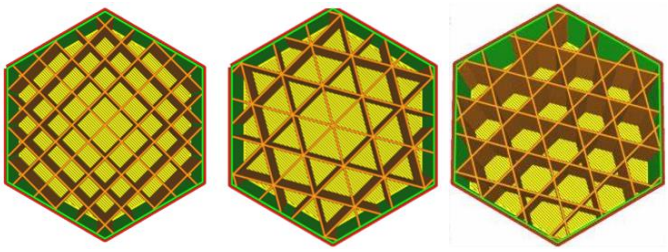


Figure 2. Infill Patterns Investigated in This Study: Grid, Triangle, and Tri-Hexagon

2.3. Resin Filling Procedure

After FDM printing, the internal cells of the PLA specimens were filled with photopolymer resin to produce the hybrid PLA–photopolymer structures. Prior to filling, the bottom surface of each specimen was sealed with transparent adhesive tape to prevent resin leakage. The transparent tape also enabled UV radiation to reach the resin from the bottom side of the specimen during curing.

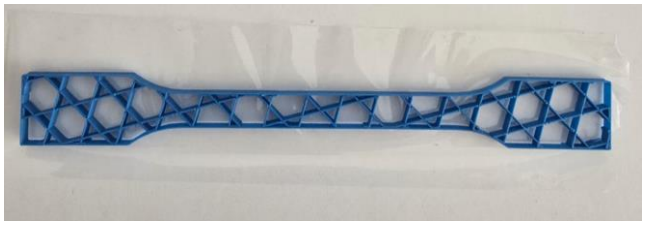


Figure 3. Sealed Bottom Surface of the Specimen Prior to Resin Filling.

The photopolymer resin was introduced manually into the internal cells in three successive stages. In the first stage, the cells were filled to approximately one-third of their volume and the resin was subsequently UV-cured using an Anycubic Wash & Cure 3 unit. The procedure was repeated by filling the cells to approximately two-thirds of their volume, followed by a second curing cycle. Finally, the remaining cell volume was filled with resin and a final UV-curing cycle was performed. The staged procedure was used to promote curing throughout the resin-filled volume and to reduce the likelihood of uncured resin remaining within the internal structure.

Figure 4. Stages of the Photopolymer Resin Filling and UV Curing Process.

2.4 Tensile Testing

The mechanical properties of the fabricated specimens were evaluated by tensile testing in accordance with the ISO 527-2 standard [10]. The tests were performed using a Shimadzu AGS-X universal testing machine. Prior to testing, a gauge length of 115 mm was marked on each specimen using a digital caliper.

The specimens were positioned between the pneumatic grips of the testing machine and clamped at an air pressure of 2 bar to prevent slippage during testing. Tensile tests were conducted at a crosshead speed of 5 mm/min, and the load was continuously increased until specimen failure. Three specimens were tested for each combination of infill density and infill geometry.

Experimental data were recorded and processed using TRAPEZIUMX software. The tensile strength was determined for each specimen, and the results for each experimental combination were expressed as the mean value and standard deviation of three measurements. Following tensile testing, the fracture surfaces were visually examined to identify cavities, porosity, and incomplete resin filling that could be associated with the observed tensile behavior.

3. Results and Discussion

3.1. Experimental Results

Tensile tests were performed for all nine combinations of infill density and infill geometry, with three specimens tested for each experimental condition. The tensile strength results are expressed as the mean value and standard deviation of the three measurements and are summarized in Table 2.

The experimental results show a pronounced dependence of tensile strength on the investigated infill configuration. The highest average tensile strength of 22.25 MPa was obtained for the Grid pattern at 25% infill density, whereas the lowest value of 12.70 MPa was obtained for the Tri-Hexagon pattern at 50% infill density. The Grid pattern exhibited the highest average tensile strength at each of the three investigated infill densities.

Table 2. Average Tensile Strength and Standard Deviation of the Tested Specimens.

Group	Tensile Strength, MPa	Standard Deviation, MPa
Grid 12.5%	21.5720	5.19430
Grid 25%	22.2536	2.58770
Grid 50%	17.1345	0.2162
Triangle 12.5%	20.7046	2.53736
Triangle 25%	19.2216	1.69334
Triangle 50%	14.5418	2.83049
Tri-Hexagon 12.5%	13.2211	5.03441
Tri-Hexagon 25%	18.1622	1.89224
Tri-Hexagon 50%	12.7027	1.72749

The results presented in Table 2 indicate that tensile strength varied considerably among the investigated combinations of infill geometry and infill density. The Grid pattern exhibited

the highest tensile strength at all three infill densities, with average values of 21.57 MPa, 22.25 MPa, and 17.13 MPa at 12.5%, 25%, and 50% infill density, respectively. The highest overall tensile strength was therefore obtained for the Grid pattern at 25% infill density.
For the Triangle pattern, the highest average tensile strength of 20.70 MPa was obtained at 12.5% infill density, followed by 19.22 MPa at 25% and 14.54 MPa at 50%. The Tri-Hexagon pattern exhibited lower tensile strength overall, with values of 13.22 MPa, 18.16 MPa, and 12.70 MPa at 12.5%, 25%, and 50% infill density, respectively. These results demonstrate that increasing the infill density did not produce a consistent increase in tensile strength. In particular, an infill density of 50% resulted in the lowest tensile strength within each of the three investigated infill geometries.

3.2. Statistical Analysis

A two-way analysis of variance (ANOVA) was performed to evaluate the effects of infill geometry, infill density, and their interaction on the tensile strength of the hybrid PLA–photopolymer structures. The analysis was conducted at a significance level of $\alpha = 0.05$. The ANOVA results are presented in Table 3.

Table 3. Two-Way ANOVA for Tensile Strength.

Source	df	SS	MS	F	*p*-value
Infill geometry	2	144.890	72.445	7.860	0.0035
Infill density	2	124.527	62.264	6.755	0.0065
Geometry × Density	4	38.403	9.601	1.042	0.4132
Error	18	165.902	9.217	–	–
Total	26	473.722	–	–	–

The ANOVA results indicate that both infill geometry ($p = 0.0035$) and infill density ($p = 0.0065$) had statistically significant effects on tensile strength at the 95% confidence level. Infill geometry exhibited a slightly higher F-value than infill density, indicating a stronger contribution to the observed variation in tensile strength within the investigated parameter range. In contrast, the interaction between infill geometry and infill density was not statistically significant ($p = 0.4132$). Therefore, the experimental results provide evidence of significant main effects of both investigated factors, but do not provide evidence of a significant interaction between them.

3.3. Effect of Infill Geometry and Infill Density

Figure 5 presents the mean tensile strength as a function of infill density for the three investigated infill geometries. The results show that the effect of increasing infill density was not monotonic. For the Grid pattern, tensile strength increased slightly from 21.57 MPa at 12.5% infill to 22.25 MPa at 25%, followed by a decrease to 17.13 MPa at 50%. A similar decrease at the highest infill density was observed for the Triangle pattern, for which tensile strength decreased from 20.70 MPa at 12.5% to 14.54 MPa at 50%. The Tri-Hexagon

pattern exhibited its highest tensile strength at 25% infill density (18.16 MPa), while lower values were obtained at both 12.5% and 50% infill density.

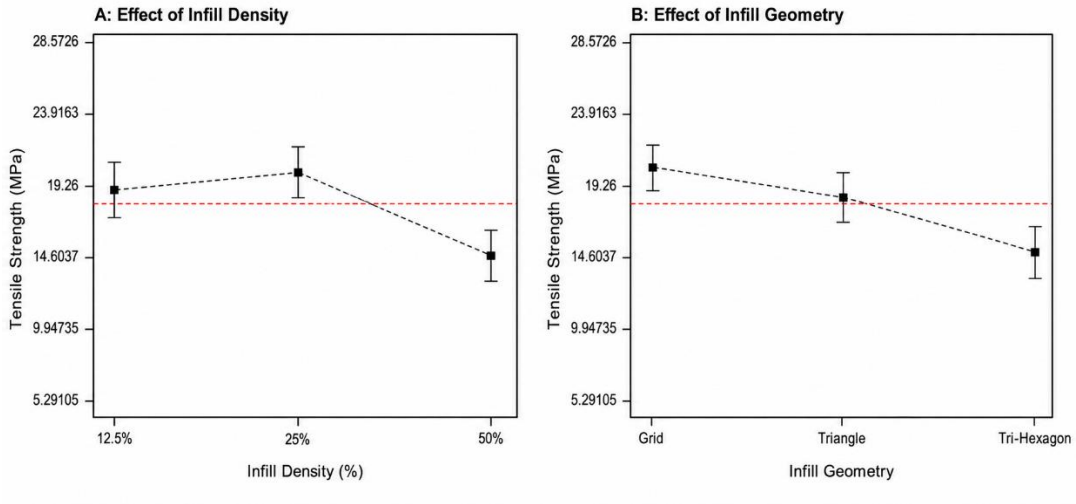


Figure 5. Effect of Infill Density and Infill Geometry on Mean Tensile Strength.

The decrease in tensile strength at 50% infill density for all three geometries indicates that increasing the amount of PLA within the investigated range did not necessarily improve the tensile performance of the resin-filled structures. As the infill density increased, the dimensions of the internal cells decreased, making manual resin filling more difficult. This may have promoted incomplete filling and the formation of internal cavities, which can act as local stress concentrators during tensile loading. The fracture-surface observations presented in Section 3.4 support this interpretation.

The interaction plot shown in Figure 6 illustrates the different tensile-strength trends obtained for the three infill geometries across the investigated infill densities. Although the non-parallel trends suggest that the response to infill density differs among the geometries, the two-way ANOVA showed that the geometry × density interaction was not statistically significant (p = 0.4132). Therefore, the observed differences in the trends should not be interpreted as evidence of a statistically significant interaction within the investigated experimental range.

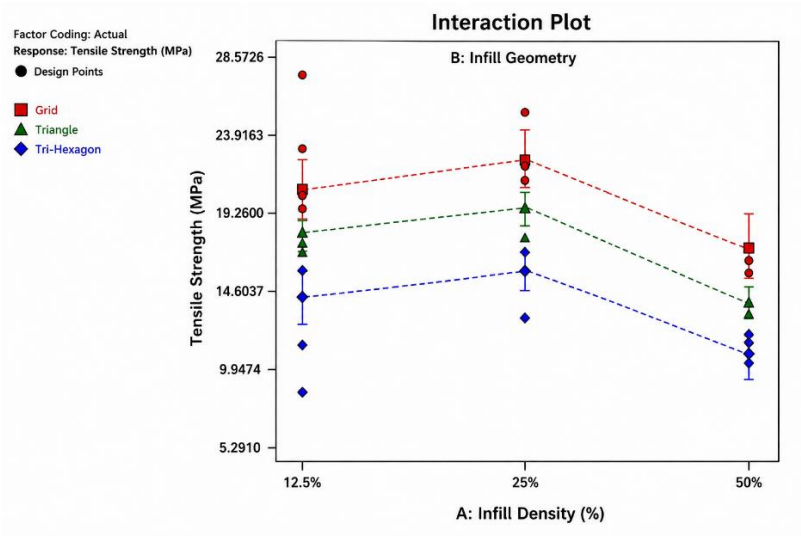


Figure 6. Interaction Plot of Infill Geometry and Infill Density for Tensile Strength.

3.4. Fracture Surface Analysis

Visual examination of the fractured specimens revealed cavities and locally incomplete resin filling within the internal structure. An example of a cavity observed in the fracture region is shown in Figure 7. Such defects reduce the effective load-bearing cross-section and may act as local stress concentrators, thereby promoting crack initiation and premature failure under tensile loading.

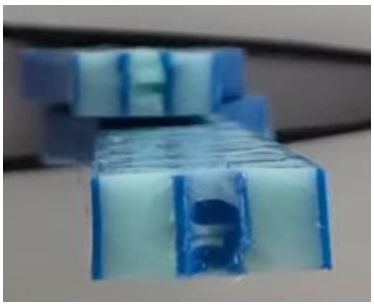


Figure 7. Cavity Observed in the Fracture Region of a Resin-Filled Specimen

The occurrence of these defects was associated with the resin-filling procedure and the dimensions of the internal cells. As the infill density increased, the available cell dimensions decreased, making manual resin introduction more difficult. This effect was particularly relevant at 50% infill density, for which all three investigated geometries exhibited lower average tensile strength than at the lower infill densities. The observed cavities therefore provide a plausible explanation for the absence of a direct increase in tensile strength with increasing infill density.

Figure 8 shows a representative fracture surface of a resin-filled specimen. The fracture appearance indicates that the mechanical response of the hybrid structures was influenced not only by the PLA infill architecture but also by the quality and uniformity of resin filling. Consequently, the results should be interpreted as the combined response of the internal geometry and the achieved filling quality rather than as an effect of infill density alone.

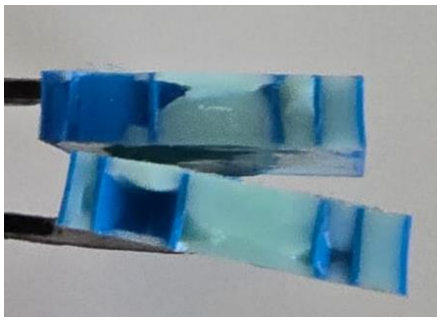


Figure 8. Typical Fracture Surface of a Test Specimen After Tensile Testing.

3.5. Discussion

Previous studies on conventional FDM-printed PLA have shown that infill density and infill geometry significantly affect tensile properties, with tensile strength generally increasing with increasing infill density [11, 12]. In the present study, however, the resin-filled structures did not exhibit this trend. An infill density of 50% resulted in lower average tensile strength for all three geometries, while the Grid pattern exhibited the highest tensile strength at each investigated density.

This behavior may be attributed to the resin-filling process. Increasing the infill density reduced the dimensions of the internal cells, making manual resin filling more difficult and promoting cavities and incomplete filling, as observed on the fracture surfaces. Therefore, in resin-filled FDM structures, infill architecture affects not only load transfer through the PLA framework but also the quality of resin filling.

A limitation of this study is that identical unfilled PLA specimens were not included as a control group and the resin-filling efficiency was not quantitatively determined. Consequently, the results demonstrate the influence of infill configuration within the investigated resin-filled structures, but do not allow the mechanical contribution of the photopolymer resin itself to be quantified independently. Future studies should include unfilled control specimens and improved resin-infiltration methods to enable a direct evaluation of the hybrid manufacturing approach.

4. Conclusion

This study investigated the effects of infill density and infill geometry on the tensile strength of FDM-manufactured PLA structures filled with photopolymer resin. The highest average tensile strength of 22.25 MPa was obtained for the Grid pattern at 25% infill density, while the lowest value of 12.70 MPa was obtained for the Tri-Hexagon pattern at 50% infill density. Two-way ANOVA confirmed that both infill geometry ($p = 0.0035$) and infill density ($p = 0.0065$) had statistically significant effects on tensile strength, whereas their interaction was not statistically significant ($p = 0.4132$). Increasing the infill density to 50% did not improve tensile strength for any of the investigated geometries. Fracture-surface examination revealed cavities and incomplete resin filling, indicating that filling quality is an important factor in the mechanical performance of the hybrid structures.

The results demonstrate that the design of resin-filled FDM structures requires consideration of both internal architecture and resin-filling quality. However, since identical unfilled PLA specimens were not included, the independent contribution of the photopolymer resin to tensile strength cannot be quantified from the present results. Future work should therefore include unfilled control specimens and improved resin-infiltration methods to reduce internal defects.

Acknowledgements
This paper presents selected results of the master thesis completed and defended by Luka Brčić under the supervision of Assistant Professor Ivan Grgić at the University of Slavonski Brod, Faculty of Mechanical Engineering, in 2025.

Funding
This research paper was funded by the University of Slavonski Brod through the institutional research project Analysis of the influence of design and process parameters of FDM technology on the mechanical and vibrational properties of polyamide PA6 tooth of a cylindrical spur gear for the purpose of optimizing the hybrid infill structure design (ASPFDM-PA6), financed by the European Union – NextGenerationEU. The views and opinions expressed in this paper are those of the author and do not necessarily reflect the official position of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

5. References

[1] ISO 52900:2021. Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.
[2] Gibson, Ian; Rosen, David W.; Stucker, Brent; Khorasani, Mahyar. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 3rd ed. Cham: Springer, 2021. (ISBN 978-3-030-56126-0).
[3] Chua, C. K.; Leong, K. F. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. 5th ed. Singapore: World Scientific Publishing, 2017.
[4] Chacón, J. M.; Caminero, M. A.; García-Plaza, E.; Núñez, P. J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection // Materials & Design, 124(2017), 143–157.
[5] Farah, S.; Anderson, D. G.; Langer, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review // Advanced Drug Delivery Reviews, 107(2016), 367–392.
[6] Torrado Perez, A. R.; Roberson, D. A.; Wicker, R. B. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials // Journal of Failure Analysis and Prevention, 14(2014), 3; 343–353.
[7] eSUN Industrial Co., Ltd. S200 Standard Resin Light Blue – Technical Data Sheet. Shenzhen, China, 2024.

[8] Ngo, T. D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K. T. Q.; Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering, 143(2018), 172–196.

[9] Montgomery, Douglas C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2019.

[10] ISO 527-2:2012. *Plastics – Determination of Tensile Properties – Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics*. Geneva: International Organization for Standardization, 2012.

[11] Ambati, S. S., Ambatipudi, R.: Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 64, 2022, pp. 804–807. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.312.

[12] Dave, H. K., Patadiya, N. H., Prajapati, A. R., Rajpurohit, S. R.: Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 235, No. 10, 2021, pp. 1811–1827. DOI: 10.1177/0954406219856383.

Remont mobilnog postrojenja za eksploataciju ugljikovodika
Overhaul of a mobile plant for hydrocarbon exploitation

T. Šarić[1,*], M. Došlović[2], R. Lujić[1] , K. Katić[1]

[1]Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Hrvatska
[2] Novska, Jazovica 58, Hrvatska

[*]Autor za korespondenciju, e-mail: tsaric@unisb.hr

Sažetak
Plan održavanja koji uključuje i planske popravke (remont) opreme za eksploataciju ugljikovodika je ključan za raspoloživost, sigurnost i pouzdan rada opreme. U radu su prikazane plansko-preventivne aktivnosti, odnosno remont glavnih sklopova mobilnog postrojenja. Planski je pripremljen remont sa potrebnom tehnološkom i operativnom dokumentacijom a ciklus ponovljivosti je pet godina. U planiranju i praćenju aktivnosti održavanja tijekom rada mobilnog postrojenja koristi se informatički sustav GALIOT. Za poslove planiranja i praćenja remonta korišten je MS Project. Analizom provedenih aktivnosti remonta utvrđeno je da doprinosi smanjenju zastoja, učinkovitijem upravljanju održavanja te duljem radnom vijeku mobilnog postrojenja.

Ključne riječi: Održavanje, remont, mobilno postrojenje, plansko-preventivno održavanje

Abstract
A maintenance plan that includes overhaul of hydrocarbon exploitation equipment is crucial for the availability, safety and reliable operation of the equipment. The paper presents the overhaul activities for the main components of the mobile plant. The overhaul was planned using technological and operational documentation. The overhaul cycle is repeated every five years. The GALIOT information system is used to plan and monitor maintenance activities during operation of the mobile plant. MS Project was used to plan and monitor the overhaul. Analysis of the completed overhaul activities has shown that they contribute to reduced downtime, more efficient maintenance management and a longer service life of the mobile plant.

Key words: maintenance, overhaul, mobile plant, planned and preventive maintenance

1. Uvod

Industrija plina i nafte zauzima strateški važno mjesto u globalnom energetskom sustavu, pri čemu proces bušenja predstavlja temeljnu fazu u istraživanju i eksploataciji ležišta ugljikovodika. Razvoj mobilnih postrojenja za bušenje omogućio je značajno povećanje fleksibilnosti operacija, osobito na geografski zahtjevnim i infrastrukturno nerazvijenim područjima. Takva postrojenja karakterizira visoka razina tehničke složenosti, integracija mehaničkih, hidrauličkih i elektroničkih sustava te kontinuirana izloženost zahtjevnim radnim uvjetima, uključujući visoka opterećenja, ekstremne temperature i agresivne radne medije.

Istraživanje i eksploatacija ugljikovodika obuhvaća niz složenih tehničkih postupaka kojima se identificiraju, potvrđuju i iskorištavaju ležišta prirodnog plina i nafte. Jedna od najvažnijih faza ovog procesa je bušenje istražnih i eksploatacijskih bušotina, kojima se omogućuje pristup ležištu te prikupljanje podataka o geološkim i proizvodnim karakteristikama. Tijekom eksploatacijskog vijeka bušotine često dolazi do smanjenja proizvodnje, mehaničkih oštećenja ili drugih izvanrednih okolnosti koji zahtijevaju izvođenje različitih remontnih i servisnih zahvata. U takvim slučajevima koriste se mobilna remontna postrojenja koja omogućuju učinkovito izvođenje intervencija na bušotini, održavanje proizvodne opreme te osiguravanje kontinuirane i sigurne eksploatacije ugljikovodika.

U takvim okolnostima, održavanje i remont mobilnog postrojenja predstavlja ključne čimbenike za osiguranje njihove funkcionalnosti, pouzdanosti i sigurnosti rada. Služba održavanja obuhvaća niz planiranih i neplaniranih aktivnosti usmjerenih na očuvanje ili vraćanje radne sposobnosti opreme, uključujući plansko-preventivno, korektivno i sve češće prediktivno održavanje temeljeno na praćenju stanja sustava (*Condition Based Maintenance - CBM*). Učinkovito upravljanje održavanjem zahtijeva interdisciplinarni pristup koji uključuje tehničku dijagnostiku, analizu kvarova, optimizaciju radnih procesa te primjenu suvremenih metodologija kao što su održavanje usmjereno na pouzdanost (*Reliability Cantered Maintenance - RCM*) i cjelovito produktivno održavanje (*Total Productive Maintenance* - TPM). Planski popravci (remont) mobilnih postrojenja predstavljaju složen i organizacijski zahtjevne procese koji uključuju detaljne preglede, obnovu, zamjenu ili modernizaciju ključnih komponenti sustava. Njegova provedba ima za cilj produženje radnog vijeka opreme, povećanje razine pouzdanosti i raspoloživosti te smanjenje rizika od iznenadnih kvarova i zastoja u radu. Osim tehničkih aspekata, remont uključuje i značajne logističke, ekonomske i sigurnosne komponente, budući da se često provodi u specifičnim uvjetima rada i uz stroge zahtjeve zaštite na radu i očuvanja okoliša. S obzirom na visoke troškove zastoja u operacijama bušenja te potencijalne sigurnosne i ekološke posljedice kvarova, optimizacija strategija održavanja i pravilno planiranje remonta imaju izniman značaj za ukupnu učinkovitost i održivost poslovanja u industriji eksploatacije ugljikovodika. U tom kontekstu, sve veću ulogu imaju: digitalne tehnologije, automatizacija, sustavi za nadzor u stvarnom vremenu, primjena metoda umjetne inteligencije koje omogućavaju pravovremeno donošenje racionalnih odluka i povećanje operativne raspoloživosti i pouzdanosti.

Cilj ovog rada je analizirati mobilna postrojenja za eksploataciju ugljikovodika te prikazati postupke (aktivnosti) planskih popravaka (remonta) s tehničkim, organizacijskim i sigurnosnim aspektom njihove provedbe. U radu su dani postupci pregleda i remonta ključnih sklopova mobilnog postrojenja. Posebna pozornost posvećena je plansko-

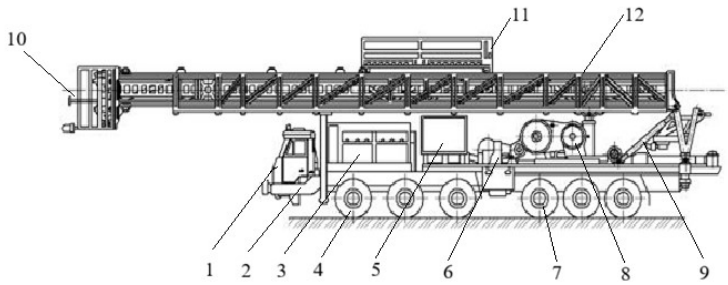
preventivnom održavanju kao važnom čimbeniku u osiguravanju pouzdanog, sigurnog i ekonomičnog rada opreme. Također prikazana je primjena informacijskog sustava GALIOT te MS Project-a u planiranju, praćenju i evidentiranju aktivnosti održavanja, s ciljem povećanja raspoloživosti opreme, smanjenja troškova održavanja i unaprjeđenja učinkovitosti eksploatacijskih procesa.

2. Mobilno postrojenje za eksploataciju ugljikovodika

Mobilno postrojenje za eksploataciju ugljikovodika predstavlja kompleksan tehnički sustav namijenjen izvođenju operacija bušenja na različitim lokacijama, uz mogućnost relativno brze montaže, demontaže i transporta. Razvoj ovakvih postrojenja omogućio je značajnu fleksibilnosti u istraživanju i eksploataciji ležišta ugljikovodika. Mobilna postrojenja karakterizira visoka razina tehničke složenosti, integracija različitih sustava te rad u otežanim uvjetima. Osnovna funkcija mobilnog postrojenja jest izrada bušotine kroz slojeve tla i stijena s ciljem dosezanja produktivnih ležišta. Tijekom procesa potrebno je osigurati kontinuirano gibanje bušaće kolone, učinkovito uklanjanje izbušenoga materijala odnosno „isplake“, kontrolu tlaka u bušotini te stabilnost stjenki bušotine. Osnovna prednost mobilnih u odnosu na stacionarna postrojenja je visoka mobilnost uz zadržavanje funkcionalnosti potrebnih za sigurno i kontrolirano bušenje. Remontna mobilna postrojenja sastavni su dio opreme bilo koje kompanije koja se bavi bušenjem ili servisima vezanim uz bušenje na kopnu ili moru.

2.1. Sažeti tehnički opis mobilnog postrojenja

Remontno mobilno postrojenje je mobilna platforma na kojoj se nalazi standardna oprema uz mogućnost brzog i lakog premještanja na udaljene lokacije. Postrojenje je vozilo s kamionskom šasijom oslonjeno na 3 do 6 parova pogonskih kotača sa ugrađenim tornjem, mehanizmom za dizanje tereta te kabinom za vozača. Standardnu opremu mobilnog remontnog postrojenja čini [1]: toranj; vozila; dizalice; nepomično i pomično koloturje, kuke; pod-konstrukcije tornja; pogon (vozila i radnog bubnja) i instalacije (električna, hidraulična i pneumatska). Slika 1. prikazuje opći shematski prikaz remontnog mobilnog postrojenja zajedno sa osnovnom opremom. Iz shematskog prikaza vidljive su numeričke oznake pojedinih dijelova postrojenja: 1-Kabina za vozača, 2-Vozilo, 3-Pogonski motor, 4-Prednje vratilo, 5-Spremnik za ulje i rashladnu tekućinu, 6-Prijenosnik snage, 7-Stražnje vratilo, 8-Dizalica, 9-Hidraulični cilindar, 10-Nepomično koloturje, 11-Tornjaška bina, 12-Toranj. U radu će se fokus staviti na mobilno postrojenje LYB-42 (Slika 2.).



Slika 1. Remontno mobilno postrojenje

Slika 2. Postrojenje LYB-42

3. Pregled remontnih aktivnosti na mobilnom postrojenju LYB-42

Remontne aktivnosti mobilnog postrojenja LYB-42 predstavljaju planski organizirani skup preventivnih, kontrolnih i korektivnih aktivnost održavanja koje se provode svakih pet godina. Provedba planskih aktivnosti temelji se na tehničkoj dokumentaciji proizvođača, internim procedurama održavanja te rezultatima prethodnih pregleda i dnevnih izvješća o radu postrojenja [2]. U okviru planiranih aktivnosti provode se detaljni pregledi konstrukcijskih elemenata, pogonskih sklopova, hidrauličkog sustava, elektroinstalacija i sigurnosnih uređaja. Aktivnosti uključuju kontrolu istrošenosti dijelova, dijagnostiku mogućih nepravilnosti, zamjenu oštećenih ili dotrajalih komponenti, podmazivanje pokretnih elemenata te funkcionalna ispitivanja sustava nakon završetka servisnih radova.

Proces izvođenja aktivnosti evidentira se kroz dnevna izvješća koja sadrže podatke o izvršenim radovima, korištenim rezervnim dijelovima, vremenu trajanja zahvata i uočenim tehničkim odstupanjima. Analizom prikupljenih podataka moguće je procijeniti stanje mobilnog postrojenja te planirati buduće aktivnosti održavanja i modernizacije sustava. Za radove na remontu mobilnog bušaćeg postrojenja LYB-42 planirano je 3 mjeseca od strane investitora. Prije početka remonta oblikovan je plan kroz gantogram aktivnosti. Plan omogućuje operativno organiziranje aktivnosti po djelatnostima te angažiranje vanjskih dionika. S obzirom na složenost i opseg radova, angažirana su tri djelatnika od strane investitora koji prate tijek i kvalitetu provođenja remontnih aktivnosti. Vanjski dionici su tvrtke „treće strane“, TUV Croatia i Derrick Service Limited koje nadziru i prate radove te o tome vode izvještaje. Na kraju remonta izdaju certifikat o izvedenim radovima i normama koje su primijenjene i kojima se vodilo tokom servisa. Slika 3. i 4. prikazuju vozilo i podvozje mobilnog postrojenja prije i nakon izvršenja svih aktivnosti generalnog remonta [2]. U nastavku će se pokazati dio aktivnosti plana remonta za odabrano sklopovlje mobilnog postrojenja a za cjeloviti prikaz izvršenih aktivnosti remonta pogledati u [2].

Slika 3. Vozilo prije aktivnosti remonta

Slika 4. Vozilo nakon aktivnosti remonta

3.1. Aktivnosti remonta na vozilu i podvozju LYR-42

Vozilo je kompletno očišćeno od prljavština i masnoće, potom je cjelovito pjeskareno. Provedena je ne razorna metoda ispitivanja MPI (ispitivanje magnetskim česticama) kritičnih točaka postrojenja, zavara, uški te ključnih navojnih spojeva. Izvršena je anti-korozivna zaštita vozila, odnosno odrađeno je nanošenje temeljne boje i završne boje na vozilo.

Postrojenje pogone dva motora CAT 3406 s kojih se snaga prenosi na mjenjače Allison CLBT-5861-4 su pregledani. Motori imaju više od 30 tisuća radnih sati te je bio plan da se izvrši generalni remont motora kako bi narednih 5 godina postrojenje moglo raditi bez većih zastoja. Tijekom remonta oba motora i mjenjača su servisirani te su vraćeni na postrojenje. Pregled i servis sklopa prednje osovine (Slika 5) obuhvaća demontažu i montažu kotača, ujedno se obavlja i pregled kočionih obloga i kočionih bubnjeva, te pregled ležaja kotača. Ugrađeni su novi ležaji i semerinzi na kotačima. Pregledom „spona“ i mostova ustanovljeno je oštećenje gumenih dijelova te su angažirani podizvođači koji su izradili i ugradili nove gumene elemente. Nakon zamjene dijelova obavljeno je podmazivanje kočionih ključeva, poluga i krajnika. Tijekom servisa ugrađeni su novi kočioni cilindri, regulatori i upravljački ventili. Kočioni mehanizam je podešen kako bi se ostvarile potrebne sile kočenja na svakom kotaču. Na upravljačkom mehanizmu su zamijenjeni regulatori i ventili, izvršen je servis hidrauličnih cilindara upravljača (volana). Pregled i servis stražnjih sklopova pogonskih kotača (Slika 6) obuhvaća demontažu i montažu kotača, ujedno se obavlja i pregled kočionih obloga i kočionih bubnjeva, te pregled ležaja kotača. Ugrađeni su novi ležaji i semerinzi na kotačima. Iz diferencijala je ispušteno staro ulje, kroz okno je prekontrolirano stanje zupčanika. Nakon što je utvrđeno da nema oštećenja na zupčanicima uliveno je novo ulje.
Stražnji sklopovi pogonskih kotača, povezani su putem kardanskih vratila. Kardanska vratila su demontirana te su ugrađeni novi križevi kardana. Nakon izvršenih radova kardani su otpremljeni na balansiranje kako tokom rada ne bi dolazilo do pojave vibracija koje mogu uzrokovati oštećenja. Prihvatne točke na šasiji vozila se čiste i pripremaju za NDT pregled kako bi se utvrdilo da nema pojave inicijacije pukotina.

Slika 5. Prednja osovina

Slika 6. Sklop stražnjih pogonskih kotača

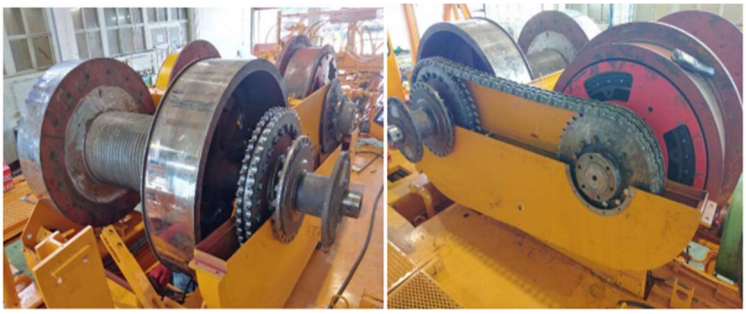
U sklopu servisa vozila obavlja se i servis instalacija. Ugrađena je kompletno nova 24V instalacija (svjetla, pokazivači smjera) te su izrađene nove instalacije potrebne za rad motora. Demontiraju se svi mjerni uređaji (tlak ulja i zraka, temperatura ulja, vode) te se ispituju. Mjerni uređaji koji su neispravni ili imaju preveliko mjerno odstupanje se zamjenjuju novima.

3.2 Aktivnosti remonta na dizalici

Najopsežniji radovi na postrojenu provode se na dizalici, odnosno radnom bubnju (Slika 7.) i bubnju za „klipovanje“. Pri tom su uključeni radovi na kočionom mehanizmu radnog bubnja te bubnju za „klipovanje“. Servis radnog bubnja (Slika 8.) započinje demontažom zaštitnih limova, kočionih traka i pripadajućih pogonskih elemenata. Nakon ispuštanja ulja iz lančanih

kutija izvršena je demontaža pogonskih lanaca, rastavljanje lančanih kutija te uklanjanje elemenata, sustava za hlađenje kočionih vijenaca. Nadalje, demontirani su spojka i bandaža s vratila radnog bubnja, a vodovi za podmazivanje glavnih ležaja su od spojeni radi omogućavanja daljnjeg rastavljanja sklopa. Po završetku pripremih radova, radni bubanj je demontiran s postrojenja nakon čega je provedeno rastavljanje pripadajućih komponenti, uključujući „zvono“ spojke s ležajevima, pogonski lančanik radnog bubnja te lančanik pogona hidro-dinamičke kočnice. Demontirani su i glavni ležaj bubnja, čije je stanje ukazivalo na potrebu zamjene. Ispitivanje komponenata dizalice definiraju se prema kategorijama tehničkih pregleda, a definiran je standardom [3]. Radi utvrđivanja eventualnih oštećenja materijala provedena je magnetna kontrola pukotina (MPI pregled) vratila i bubnja. Istodobno je izvršen pregled sustava za pravilno namatanje užeta, dok su istrošene bočne površine bubnja sanirane postupkom navarivanja potrošnih ploča. Prije zamijene potrošenih elemenata novima, provedena je priprema dosjednih površina vratila i kućišta ležaja kako bi se osigurala odgovarajuća točnost i pravilan rad sklopa. Na vratilu bubnja ugrađeni su novi ležaji te novi semerinzi odgovarajućih dimenzija. Nakon toga bubanj je ponovno postavljen na postrojenje, a zatim su montirani lančanici, zvono spojke s novim ležajevima te nova zračna spojka. Nakon toga montirane su kočione trake na kočione vijence bubnja, a izrađeni su i novi vodovi za hlađenje kočionih vijenaca. Također su izrađene nove brtve te su instalirane lančane kutije i pogonski lanci. Nakon završetka montažnih radova izvršeno je podmazivanje ležaja i punjenje lančanih kutija uljem, nakon čega su postavljeni zaštitni limovi i provedena je završna kontrola funkcionalnosti sustava.

Slika 7. Radni bubanj



Slika 8. Servis na radnom bubnju

3.3. Aktivnosti remonta kočionog mehanizma

Kočioni mehanizam radnog bubnja je sklop vratila i poluga koji omogućava pravilnu raspodjelu kočione sile na vijencima bubnja uslijed pritiska poluge od strane operativca. Mehanizam je rastavljen zbog detaljnog pregleda i obnove istrošenih dijelova. Najprije su demontirane kočione trake i kočione poluge, nakon čega je provedeno „*piksiranje*“ istrošenih uški na kočionom mehanizmu te izrada novih svornjaka. Svi elementi kočionog sustava pripremljeni su za ne razorna ispitivanja (NDT pregled) s ciljem provjere strukture ispravnosti i utvrđivanja eventualnih pukotina ili drugih nepravilnosti nastalih tijekom eksploatacije. Nakon provedenih pregleda ugrađene su nove kočione obloge s odgovarajućim vijcima (ne iskreći vijci). Nakon završetka montaže provedeno je podmazivanje svih spojeva i pokretnih dijelova kočionog mehanizma. Završna faza obuhvatila je podešavanje kočnica radnog bubnja kako bi se osiguralo ravnomjerno i sigurno kočenje tijekom rada postrojenja.

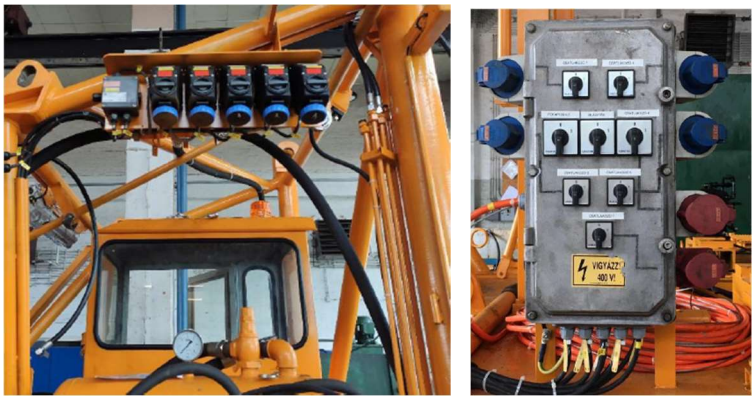
3.4 Aktivnosti remonta reduktora

Servisiranje započinje ispuštanjem ulja iz kućišta glavnog i pomoćnog reduktora. Nakon toga uslijedilo je demontiranje poklopca reduktora te je proveden vizualni pregled zupčanika unutar glavnog i pomoćnog reduktora. Pregledom nisu utvrđena oštećenja ni nepravilnosti u radu zupčanika prijenosnog sustava. U nastavku planiranih radova demontiran je bočni poklopac vratila nakon čega je izrađena nova potisna čahura ležaja zbog istrošenosti postojećeg elementa. Na vratilu je montiran novi radijalno - aksijalni ležaj, čime je osigurana pravilna aksijalna i radijalna stabilnost sklopa. Na vanjskoj strani ulaznih vratila reduktora izvršena je zamjena ležajeva i semeringa. Ugrađen je novi kuglični ležaj te semering odgovarajuće dimenzije. Nakon završetka montažnih radova izvršeno je punjenje reduktora novim uljem Hipenol 90, čime su osigurani odgovarajući uvjeti podmazivanja i zaštite prijenosnih elementa tijekom rada. Slika 9. prikazuje servis reduktora.

Slika 9. Servis reduktora

3.5 Aktivnosti remonta električnih instalacija

U sklopu servisiranja električnih instalacija (Slika 10.) na postrojenju izvršeni su uvodni i montažno-demontažni radovi s ciljem obnove i funkcionalnog osposobljavanja postojećeg sustava rasvjete, napajanja i pomoćnih električnih uređaja na tornju. Radovi na tornju uključivali su demontažu postojeće električne instalacije i pripadajuće opreme s tornja i „tornjaške“ bine. Nakon demontaže izvedena je montaža novih rasvjetnih tijela na pripadajuće nosače na gornjoj i donjoj sekciji tornja, kao i montaža priključnica i razvodnih kutija na istim sekcijama. Izvedeno je polaganje i spajanje kabela za napajanje električnih instalacija na sekcijama tornja, te spajanje svih elemenata sustava.



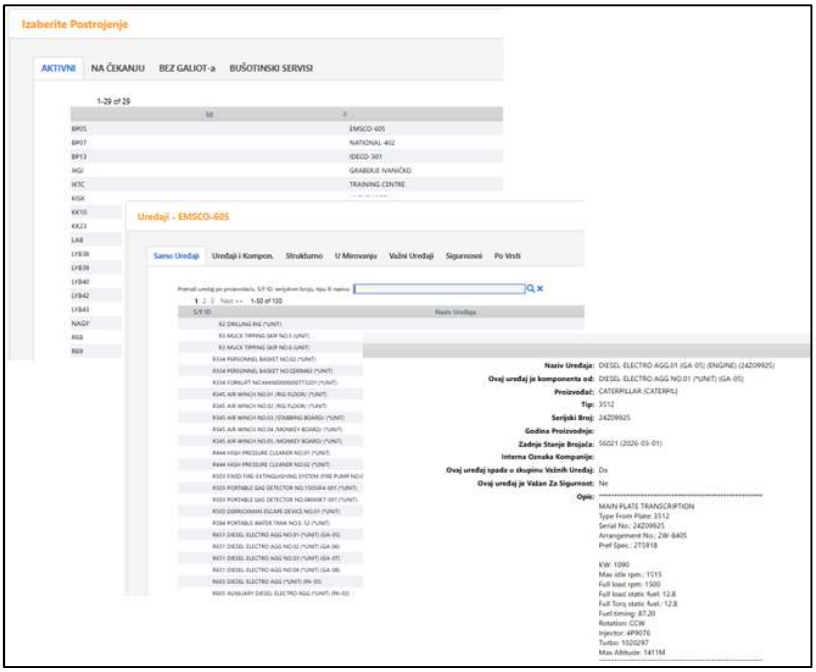
Slika 10. Prikaz električne instalacije nakon remonta

4. Informatička podrška održavanju i planiranju remonta

Provođenje svih aktivnosti plana održavanja popraćeno je uz podršku dva programska sustava i to Galiot [4] i MS Project [5].

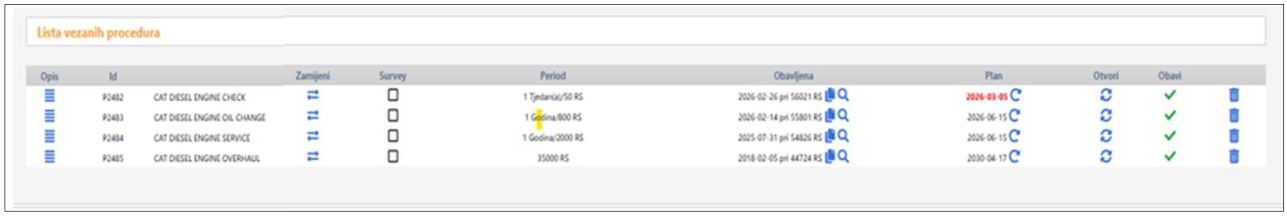
Galiot je online sustav [4] koji je dostupan djelatnicima na terenu, te osoblju zaduženom za praćenje održavanja. U IT sustavu Galiot nalazi se arhivirana sva oprema i postrojenja, sva pripadajuća dokumentacija te procedure održavanja. Galiot sustav je orijentiran korisniku te se lako može doći do popisa i stanja rezervnih dijelova potrebnih za planirane aktivnosti, tehnoloških uputa za provođenje aktivnosti održavanja. Sustav jasno upozorava (alarm) na dolazeći redovni pregled koji po planu treba obaviti na opremi. Svi obavljeni pregledi se također dokumentiraju u sustavu te se ažuriraju napomene odnosno servisni izvještaji, ovisno o složenosti pregleda. Uz to se prilažu i svi provedeni NDT izvještaji te ostali izvještaji o testiranju opreme. Isto tako, unose se i svi neplanirani kvarovi (korektivno održavanje) te se može uočiti na kojem dijelu opreme dolazi do učestalih kvarova. Na temelju evidencija (stanja) se mogu otkriti uzroci učestale pojave kvarova koji proizlaze iz preopterećenosti mehanizma ili nestručnog rukovanja opremom.

Sustav također prati ostvarene radne sate opreme, te upozorava na planirane aktivnosti održavanja (preventivno održavanje – servise). Također potiče ravnomjerno korištenje opreme (napr. kod postrojenja koje koriste više motora potiče ravnomjernu angažiranost svih motora, odnosno jednako trošenje). Osim dobre podrške djelatnicima na terenu koji mogu pristupiti informacijama u bilo koje vrijeme, jako je važan i za operativnu podršku gdje stručnjaci za održavanje mogu vidjeti anomalije u korištenju opreme. U IT sustavima koji pružaju podršku održavanju prvi korak je unos strukture postrojenja po dubini odnosno po više razina sastavnice. Na Slici 11 mogu se vidjeti aktivna postrojenja koja su trenutno u radu. Izborom pojedine opreme „po dubini“ mogu se dobiti detaljna razina informacija i podataka kao napr. serijski broj uređaja, proizvođač, tip, godina proizvodnje, brojač radnih sati, temeljne karakteristike uređaja (snaga, broj okretaja, masa, dimenzije).



Slika 11. Prikaz strukture postrojenja u IT sustavu Galiot

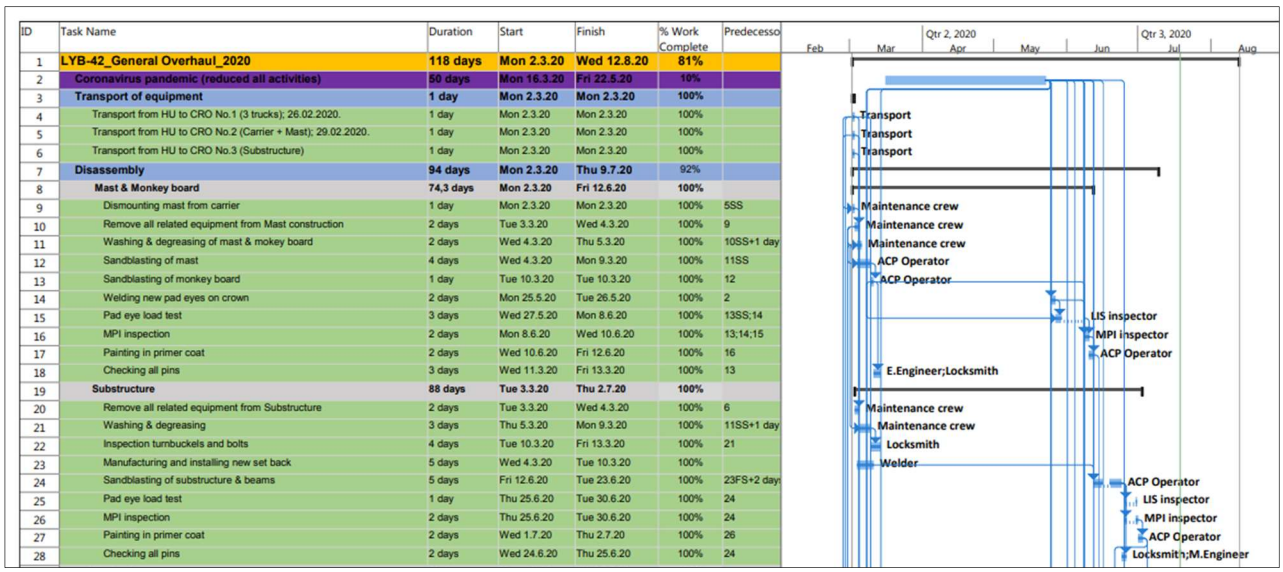
Uz općenite podatke o opremi, ponuđene su kartice gdje se jednostavno može doći do dokumentacije povezane s uređajem. Dokumentacija obično sadrži upute proizvođača za rad, servisne upute, popis rezervnih dijelova, servisne izvještaje, NDT izvještaje, izvještaje o testiranju. Također, prikazan je i jasan pregled na tehnološke procedure održavanja i njihovo provođenje. Procedure mogu biti dnevne, tjedne, mjesečne, godišnje ili vezane uz broj radnih sati (Slika 12). Vizualno se ističe koje su procedure obavljene (zelena potvrdna kvačica), procedure koje nisu obavljene, nadolazeće procedure, datum koji definira kada je plan za obavljanje sljedeće procedure te datum kada je sama procedura obavljena. Ovaj dio je posebno važan za nadređene koji na jednostavan način mogu nadgledati održavanje pojedine opreme postrojenja. Otvaranjem procedura dolazi se do detaljnog opisa procedure, odnosno svih koraka koji se moraju obaviti kako bi se procedura mogla proglasiti obavljenom.



Slika 12. Pregled aktivnosti i tehnoloških procedura

Microsoft Project (MS Project) [5] je vodeći računalni program za upravljanje projektima koji omogućuje učinkovito planiranje, izradu vremenskih rasporeda, dodjelu resursa, praćenje proračuna i analizu napretka. Osmišljen je kako bi pomogao voditeljima projekata u strukturiranju složenih poslovnih procesa i osiguranju pravovremenog dovršetka projekata.

Planiranje i praćenje izvršenja remonta provodi se uz podršku i korištenje MS Projecta. Kroz pripremu remonta odrađene su i pripremljene sve tehnološke procedure te planirani resursi. Generiran je plan remonta sa svim potrebitim parametrima (Slika 13.). Izvođenje remontnih aktivnosti prati se također kroz sustav i to generiranim planom.



ID	Task Name	Duration	Start	Finish	% Work Complete	Predecesso
1	**LYB-42_General Overhaul_2020**	**118 days**	**Mon 2.3.20**	**Wed 12.8.20**	**81%**	
2	**Coronavirus pandemic (reduced all activities)**	**50 days**	**Mon 16.3.20**	**Fri 22.5.20**	**10%**	
3	**Transport of equipment**	**1 day**	**Mon 2.3.20**	**Mon 2.3.20**	**100%**	
4	Transport from HU to CRO No.1 (3 trucks); 26.02.2020.	1 day	Mon 2.3.20	Mon 2.3.20	100%	
5	Transport from HU to CRO No.2 (Carrier + Mast); 29.02.2020.	1 day	Mon 2.3.20	Mon 2.3.20	100%	
6	Transport from HU to CRO No.3 (Substructure)	1 day	Mon 2.3.20	Mon 2.3.20	100%	
7	**Disassembly**	**94 days**	**Mon 2.3.20**	**Thu 9.7.20**	**92%**	
8	**Mast & Monkey board**	**74,3 days**	**Mon 2.3.20**	**Fri 12.6.20**	**100%**	
9	Dismounting mast from carrier	1 day	Mon 2.3.20	Mon 2.3.20	100%	5SS
10	Remove all related equipment from Mast construction	2 days	Tue 3.3.20	Wed 4.3.20	100%	9
11	Washing & degreasing of mast & mokey board	2 days	Wed 4.3.20	Thu 5.3.20	100%	10SS+1 day
12	Sandblasting of mast	4 days	Wed 4.3.20	Mon 9.3.20	100%	11SS
13	Sandblasting of monkey board	1 day	Tue 10.3.20	Tue 10.3.20	100%	12
14	Welding new pad eyes on crown	2 days	Mon 25.5.20	Tue 26.5.20	100%	2
15	Pad eye load test	3 days	Wed 27.5.20	Mon 8.6.20	100%	13SS;14
16	MPI inspection	2 days	Mon 8.6.20	Wed 10.6.20	100%	13;14;15
17	Painting in primer coat	2 days	Wed 10.6.20	Fri 12.6.20	100%	16
18	Checking all pins	3 days	Wed 11.3.20	Fri 13.3.20	100%	13
19	**Substructure**	**88 days**	**Tue 3.3.20**	**Thu 2.7.20**	**100%**	
20	Remove all related equipment from Substructure	2 days	Tue 3.3.20	Wed 4.3.20	100%	6
21	Washing & degreasing	3 days	Thu 5.3.20	Mon 9.3.20	100%	11SS+1 day
22	Inspection turnbuckels and bolts	4 days	Tue 10.3.20	Fri 13.3.20	100%	21
23	Manufacturing and installing new set back	5 days	Wed 4.3.20	Tue 10.3.20	100%	
24	Sandblasting of substructure & beams	5 days	Fri 12.6.20	Tue 23.6.20	100%	23FS+2 days
25	Pad eye load test	1 day	Thu 25.6.20	Tue 30.6.20	100%	24
26	MPI inspection	2 days	Thu 25.6.20	Tue 30.6.20	100%	24
27	Painting in primer coat	2 days	Wed 1.7.20	Thu 2.7.20	100%	26
28	Checking all pins	2 days	Wed 24.6.20	Thu 25.6.20	100%	24

Slika 13. Prikaz plana remonta u sustavu MS Project

Sve aktivnosti na projektu se detaljno opisuju u dnevnim izvještajima gdje se uz opis aktivnosti unose i nazivi ugrađenih dijelova, utrošeni radni sati po grupacijama djelatnosti, angažman podizvođača te ostali važni detalji. Na osnovu realiziranog, unosi se gotovost izvršenih aktivnosti kako bi se pratila realizacija remonta. Po realiziranom remontu mogu se provoditi zaključne analize uspješnosti remonta.

5. Zaključak

Mobilna postrojenja za bušenje i remont predstavljaju složene tehničke sustave čija raspoloživost, pouzdanost i funkcionalnosti u velikoj mjeri ovise o kvalitetno organiziranom sustavu održavanja. U radu su obrađeni osnovni principi održavanja i servisiranja sklopova mobilnog remontnog postrojenja. Poseban naglasak stavljen je na plansko-preventivno održavanje kao temeljni pristup očuvanju tehničke ispravnosti i produljenju eksploatacijskog vijeka opreme.

Prikazom provedenih remontnih aktivnosti utvrđeno je da redoviti pregledi, pravodobna zamjena istrošenih dijelova i primjena odgovarajućih metoda nadzora stanja značajno doprinose smanjenju neželjenih zastoja (udio korektivnog održavanja). Prikazani remont na ključnim komponentama potvrdili su važnost sustavnog pristupa održavanju u osiguravanju pouzdanog rada postrojenja.

U radu je također prikazana primjena informatičkog sustava GALIOT u planiranju, evidentiranju i praćenju aktivnosti održavanja. Korištenjem suvremenih IT sustava omogućeno je učinkovitije upravljanje radnim nalozima, praćenje troškova održavanja, planiranje remontnih aktivnosti (MS Project) te kvalitetnija organizacija raspoloživih resursa. Takav pristup omogućio je bolju kontrolu procesa održavanja i donošenje pravodobnih odluka temeljenih na raspoloživim podatcima.

Na temelju provedenog remonta može se zaključiti da plansko-preventivno održavanje uz primjenu suvremenih informatičkih sustava za planiranje i nadzor predstavlja važan čimbenik u postizanju željene tehničke pouzdanosti, raspoloživosti i sigurnosti rada uz troškovno učinkovit rad remontnog mobilnog postrojenja.

6. Literatura

[1] Matanović, Davorin. Tehnika izrade bušotina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2013. (ISBN 978-953-6923-08-3)
[2] Došlović, Matea. Održavanje i remont mobilnog postrojenja za bušenje nafte. Sveučilište u Slavonskom Brodu – Tehnički odjel, Završni rad (Tomislav Šarić - mentor), Slavonski Brod, 2026.
[3] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009. API RP 8B, Procedures for Inspections, Maintenance, Repair, and Remanufacture of Hoisting Equipment.
[4] https://galiot.aero/solutions_AMO.html (pristup: 18.06.2026.)
[5] https://www.microsoft.com/hr-hr/microsoft-365/project/project-management (pristup: 04.06.2026.)
[6] Šarić, Tomislav. Tehnologije održavanja i planski popravci, LMS Merlin -kolegij Održavanje postrojenja, UNISB, Slavonski Brod, 2024.