

# ZBORNIK RADOVA PROCEEDINGS

**22. SKUP O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI**  
**22<sup>nd</sup> NATURAL GAS, HEAT AND WATER CONFERENCE**

**15. MEĐUNARODNI SKUP O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI**  
**15<sup>th</sup> 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

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



**Suorganizator**  
**Co-organizer**



**Uz potporu**  
**Supported by**

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

Osijek, 25.09.- 27.09.2024.

## PLIN 2024

### ZBORNIK RADOVA 15. MEĐUNARODNOG SKUPA O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI

### PROCEEDINGS OF 15<sup>th</sup> INTERNATIONAL NATURAL GAS, HEAT AND WATER CONFERENCE

Izdavač / Publisher: Sveučilište u Slavenskom Brodu

Email: [plin@unisb.hr](mailto: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 2024 Organizacijski odbor / PLIN 2024 Organization committee:

Josip STOJŠIĆ, Hrvatska, predsjednik organizacijskog odbora  
Dávid CSONKA, Mađarska  
Josip CUMIN, Hrvatska  
Miroslav DUSPARA, Hrvatska  
Renata ĐEKIĆ, Hrvatska  
Nada FLANJAK ROŠOČI, 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



PLIN 2024 Počasni odbor / PLIN 2024 Honor committee:

Ivan SAMARDŽIĆ, predsjednik, Hrvatska  
Vlado GUBERAC, Hrvatska  
Gabriella MEDVEGY, Mađarska  
Damir PEČUŠAK, Hrvatska  
Tomislav ŠAMBIĆ, Hrvatska

PLIN 2024 Programski odbor / PLIN 2024 Program committee:

Dražan KOZAK, predsjednik, Hrvatska  
Antun STOIĆ zamjenik pred., Hrvatska  
Bálint BACHMANN, Mađarska  
Darko BAJIĆ, Crna Gora  
Eraldo BANOVAČ, 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  
Ivica KLADARIĆ, Hrvatska  
Milan KLJAJIN, Hrvatska  
Janez KOPAČ, Slovenija  
Grzegorz KROLCZYK, Poljska  
Stanislaw LEGUTKO, Poljska  
Leon MAGLIĆ, Hrvatska  
Siniša MARIČIĆ, Hrvatska  
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  
Marko RAKIN, Srbija  
Miomir RAOS, Srbija  
Pero RAOS, Hrvatska  
Alessandro RUGGIERO, Italija

Aleksandar SEDMAK, Srbija  
Marinko STOJKOV, Hrvatska  
Josip STOJŠIĆ, Hrvatska  
Igor SUTLOVIĆ, Hrvatska  
Tomislav ŠARIĆ, Hrvatska  
Mladen ŠERCER, Hrvatska  
Damir ŠLJIVAC, Hrvatska  
Zlatko TONKOVIĆ, Hrvatska  
Zdravko VIRAG, Hrvatska  
Nikola VIŠTICA, Hrvatska  
Jurica VRDOLJAK, Hrvatska  
Marija ŽIVIĆ, Hrvatska

## Sadržaj / Contents

### **POZVANO PREDAVANJE / INVITED LECTURE**

MATHEMATICAL BACKGROUND OF FREE CARBON DIOXIDE EMISSIONS CALCULATION ... 1  
I. Sutlović, V. Božić, N. Vištica

PROBLEMS IN THE CHARACTERIZATION OF BORIDE LAYERS ..... 6  
A. Milinović, J. Stojšić, S. Šimunović, M. Margetić Butković, G. Zeba, J. Mijić

### **PLIN I PLINSKA TEHNIKA / GAS AND GAS TECHNIQUE**

LIQUEFIED NATURAL GAS IS A MIXTURE OF GASES ..... 15  
S. Franjić

KOROZIJSKI UTJECAJ BIOPLINA NA DIJELOVE BIOPLINSKOG POSTROJENJA ..... 23  
I. Vidaković, G. Heffer, G. Pačarek, V. Tadić, K. Šimunović, M. Nadarević

### **ENERGETIKA I TOPLINSKA TEHNIKA / ENERGETICS AND HEATING TECHNIQUE**

IZAZOVI UGRADNJE SPLIT KLIMA UREĐAJA ..... 32  
M. Đogaš, H. Glavaš, M. Primorac, M. Žnidarec

POTENCIJAL SNIŽAVANJA TEMPERATURE OGRJEVNE VODE U CENTRALIZIRANIM  
TOPLINSKIM SUSTAVIMA TREĆE GENERACIJE ..... 45  
D. Požgaj, B. Delač, B. Pavković

ENERGETSKA I EKONOMSKA ANALIZA ZAMJENE ENERGENTA U SUSTAVU GRIJANJA  
VIŠEOBITELJSKE KUĆE ..... 54  
B. Delač, T. Čanić, B. Pavković

ČIMBENICI MOTIVACIJE UGRADNJE SUSTAVA UPRAVLJANJA ENERGIJOM ..... 64  
F. Ambrinac, G. Knežević, D. Topić, N. Mišljenović

OPPORTUNITIES AND LIMITATIONS IN THE UTILIZATION OF HYDROGEN FOR  
COMBUSTION PURPOSES ..... 74  
Gy. Vasvári, B. Kurilla, J. Vajda

ANALYSING THE IMPACT OF GAP FORMATION IN TUBE-FIN HEAT EXCHANGERS ON  
LONGEVITY: A RETROSPECTIVE SIMULATION STUDY ..... 86  
T. Bitó, Á. Cvenits, G. Loch, L. Budulski, Z. Meiszterics, T. Zsebe, Gy. Vasvári, B. Babits, D.  
Csonka

DILEMA OKO ZELENE (ENERGETSKE) TRANZICIJE ..... 95  
M. Ivanović

THE CONCEPT OF ENERGY-EFFICIENT TEXTILE INDUSTRY ..... 105  
M. Glogar, I. Čorak

RAZVOJ MODULA ZA PRIKLJUČIVANJE DIZALICE TOPLINE NA SUSTAV PODNOG  
GRIJANJA ..... 116  
M. Lovrić, E. Kamenar, V. Prokop, V. Glažar

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

ODRŽAVANJE SUSTAVA JAVNE ODVODNJE: ČIŠĆENJE CIJEVI, INSPEKCIJA I CCTV PREGLED.....	128
D.Obradović, M. Mesaroš	
OPASNOSTI I POTREBNE MJERE ZA SIGURNOST PRI RADU S GRAĐEVINSKIM SKELAMA.....	141
D. Vidaković, A. Jurić	
OZLJEDE NA RADU U GRAĐEVINARSTVU I ZAŠTITA NA RADU .....	153
D. Obradović, S. Obradović	
KARAKTERISTIČNE SITUACIJE KOD PRIJEVOZA PLINOVA U POSUDAMA POD TLAKOM CESTOVNIM PROMETOM.....	164
M. Krstajić	
KLIMATSKE PROMJENE I OBRANA OD TUČE U HRVATSKOJ.....	177
M. Ivanović	
PROBLEMATIKA URBANE ODVODNJE - PRIMJER POPLAVNOG DOGAĐAJA (VIDRENJAK, 2014.) .....	187
S. Maričić, T. Mijušković – Svetinović	
GREEN ROOFS AS A MEANS OF STORMWATER MANAGEMENT IN THE SUSTAINABLE RECONSTRUCTION/REHABILITATION OF PREFABRICATED CONCRETE BUILDINGS .....	199
L. Ben Khadra, J. Pál-Schreiner	

**KONSTRUIRANJE I PROIZVODNE TEHNOLOGIJE / DESIGN AND PRODUCTION  
TECHNOLOGIES**

CALCUTION OF BENDING POSITION CHANGE .....	209
B. Grizelj, M. Duspara, M Stoić, V. Starčević, M. Kokorić, S. Kokorić, M. Čuletić Čondrić, K. Vuletić	
PRIMJENA PROŠIRENA STVARNOSTI U 3D OBLIKOVANJU.....	219
S. Švoger, A. Čikić, Z. Busija	
IMPROVEMENTS IN THE TEXTILE INDUSTRY THROUGH ROBOTICS AND AUTOMATION .....	229
J. Matijević, I. Brlek, A. Sutlović	
KORIŠTENJE WEB SERVERA U SIEMENS LOGO! APLIKACIJAMA.....	239
Z. Busija, S. Švoger, J. Srpak, L. Horvat	
ISPITIVANJE ADHEZIJSKIH SVOJSTAVA OSTVARENIH RAZLIČITIM POSTUPCIMA APLIKACIJE TEMELJNIH PREMAZA.....	249
T. Šolić, D. Marić, I. Deanović, B. Kovačević, M. Pintarić, D. Takač, I. Samardžić, M. Samardžić	
ECO-DESIGN OF STEEL STRUCTURES .....	259
Gy. Vasvári, F. Orbán, T. Zsebe, Cs. Dávid	

---

MANUFACTURING CAST PARTS USING ADDITIVE TECHNOLOGY-BASED PROTOTYPE PATTERNS .....	269
Á. Vér, Gy. Vasvári, D. Csonka	
CONTINUOUS WAVE AND FEMTOSECOND LASER INDUCED HYDROGEN DECOMPOSITION .....	277
B. Kurilla, Gy. Vasvári, D. Csonka	
ON-LINE MONITORING, KALIBRACIJA I INSPEKCIJA OPREME ZA ZAVARIVANJE .....	294
D. Marić, D. Takac, J. Mijić, I. Deanović, I. Samardžić, T. Šolić, M. Samardžić	
OPTIMIZATION OF STEEL WATCHTOWER STRUCTURE USING EUROCODE 3 AND ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS .....	302
M. Vilić, J. Marijić, I. Grgić, M. Karakašić, Ž. Ivandić, D. Mačinković	
TENSILE SHEAR STRENGTH OF A BONDED JOINT OF 3D PRINTED PLA USING DISSOLVED ABS .....	310
I. Grgić, J. Marijić, M. Vilić, M. Karakašić	
PRIMJENA SUVREMENIH UGLJIČNIH MATERIJALA U SUSTAVIMA ZA ISKORIŠTAVANJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE .....	316
S. Kladarić, A. Kolarević, I. Kladarić	
UMJETNA INTELIGENCIJA U KONSTRUIRANJU .....	326
P. Nakić, F. Šlehta, M. Čeme, I. Džambo	
KONTROLA KVALITETE ZAVARENIH SPOJEVA PRIMJENOM AUTOMATSKE DETEKCIJE NESAVRŠENOSTI RADIOSKOPIJOM .....	335
I. Petrović, M. Stojkov, Z. Markešić	

# Mathematical background of free carbon dioxide emissions calculation

I. Sutlović<sup>1,\*</sup>, V. Božić<sup>2</sup>, N. Vištica<sup>3</sup>

University of Zagreb Faculty of Chemical Engineering and Technology, Zagreb, Croatia

<sup>2</sup> Vodovod grada Vukovara d.o.o., Vukovar, Croatia

<sup>3</sup>Croatian Energy Regulatory Agency, Zagreb, Croatia

\* Corresponding Author. E-mail: isutlo@fkit.unizg.hr

## Abstract

Calculation of free emission is very demanding process. It is fulfilled by using equations defined by appropriate documents called Guidance and Benchmarks both set by European Commission. These documents are related to sectors those are subject of carbon dioxide emission trading i.e. European Union Trading System in certain trading period.

Previous investigation fulfilled and published by same authors in which free emissions for mineral fertilizer facility are calculated pointed some critical details. They primary consists of determining internal mass and energy fluxes influencing final result and possible mistakes in calculus not affecting final result significantly. The reason for first one is unavailability of measured data or their lack. The last one is because of mathematical reason i.e. is result of mutual relation of terms in equation and is discussed in this paper.

**Key words:** free emission calculation, mathematical relation fertilizer, mass and energy

## 1. Introduction

Carbon dioxide emissions are very often discussed in professional and scientific community but also in public media with general accent on global warming and climate changes. A very complicated system is hidden behind this every day connotation enabling us quantification of these emissions. The aim of further analysis is to emphasize some mathematical aspects of carbon dioxide emissions calculation. List of activities to be subject of emission regulative are set by European Commission leading to European Union Emission Trading System (EU ETS) and are incorporated in Croatian legislative [1]. Among listed activities are ammonia and nitric acid production encountered as basic compounds in mineral fertilizer production. Thorough analysis of mentioned issue is made by authors and already published [2, 3, 4]. In these papers basic concept and principles of EU ETS are described and calculation of free emissions for mineral fertilizer facility is conducted.



## 2. Equations used in calculation of free emissions

To calculate free emissions in tons following equations are used.

- from ammonia production.

$$F_{p,k} = \frac{Em_d + Em_{nih}}{Em_d + Em_{nih} + Em_{ind}} \times BM_p \times HAL_p \times CLEF_{p,k} \quad (1)$$

and

$$Em_{ind} = electricityconsumption \times 0,376 \quad (2)$$

- from nitric acid production

$$F_{p,k} = BM_p \times HAL_p \times CLEF_{p,k} \quad (3)$$

and

$$RPA = BMH \times HAL_{h,nitricacidheat} \quad (4)$$

Given equations are proscribed by guidelines set by European Commission – Directorate General Climate Action, Directorate B – European and International Carbon Markets. The meaning of terms given in previous equations will be intentionally omitted because it would take too much room. The meaning of these terms can be found in given references or original sources from European Commission.

In further analysis these terms will be treated as pure numbers without burdening with their meaning. The idea is to show contribution and mutual relation between terms in given equations.

So, let's start!

## 3. Values of terms

Some values such as  $BM_p$  and  $CLEF_{p,k}$  are constants presented in table 1., while values of  $Em_d$ ,  $Em_{nih}$ ,  $Em_{inc}$ ,  $HAL_p$  and  $HAL_{h,nitricacidheat}$  are calculated from actual process values for instance natural gas consumption, product quantity etc. These are historical values for five year period.

**Table 1.** Values of constants  $BM_p$  and  $CLEF_{p,k}$ ,

	$BM_{p,k}$	$CLEF_{p,k}$
Ammonia	1,57	1
Nitric acid	0,23	1

For calculation is used Excell software. Values in following tables are result of inserting data in given equations. Values of free emissions in ammonia production (last row) as well as values of remaining variables necessary for further calculation are given (table 2.). There are three columns representing correct value (1st column) and two columns with intentionally made errors.

- Correct value (corr) is sum of all terms in row in Excell syntax SUM(T1:T5)

Errors are defined as follows:



- Error 1 (er1): sum of first and last term in row in Excell syntax SUM(T1;T5), notice semicolon instead colon in correct value
- Error 2 (er2): sum of all terms in row divided by 5 (years) in Excell syntax SUM(T1:5)/5

Good question is why these errors should occur. From authors' experience; "unforced errors" such as bad visibility of many numbers to manage, recklessness and "copy paste" approach (error 1) and second is sometimes unclear instructions in relevant documents, once it is sum of array of numbers, once it is mean value in five year period (error 2).

**Table 2.** Direct and indirect emissions and net imported heat in ammonia production, tons

Year	2022 corr	2022 er1	2022 er2
Em <sub>d</sub>	3452816,459	1276346,614	690563,2917
Em <sub>nih</sub>	559307,4644	206750,1116	111861,4929
Em <sub>ind</sub>	12082,41537	4466,310367	2416,483075
Free emission F <sub>p,k</sub>	670653,8221	670653,8221	670653,8221

Described errors are inserted in equations (1) and (2) (table 1.). Notice that final values in last row remains equal in all cases. The reason is obvious, in fraction the only difference between nominator and denominator is that denominator is increased by Em<sub>ind</sub> whose value is negligible in comparison to other to values (see table 1.).

Free emissions in nitric acid production are calculated using equations (3) and (4). Two cases are studied, first is correct calculation and second is error made intentionally as described below:

- corr: sum of all terms in row and divided by 5 (years) in Excell syntax SUM(T1:T5)/5
- error 1: sum of first and last term in row and divided by 5 (years) in Excell syntax SUM(T1;T5)/5, notice semicolon instead colon in correct value.

Results of described calculation are given in table 3.

There is no much to comment, equations are linear and syntax error results in significant i.e. proportional error in result given in last row of table 3.

**Table 3.** Reduced free emissions in nitric acid production, tons

	2022corr	2022 er1
Free emission F <sub>p,k</sub> , t	11431,16	4225,573
Reduction of preliminary emission RPA, t	2084,46	770,5284
F <sub>p,k</sub> -RPA, t	9346,705	3455,045

In order to complete whole calculation of free emissions for fuel and heat has to be determined. The procedure i.e. equations to be used very much similar to equation (3) thus conclusion be the same as in case of nitric acid production. Results for free heat and fuel emissions are presented in table 4.

**Table 4.** Free emissions for heat and fuel in year 2022 – exact values, tons

	Free emission $F_{h,k}$ , t
Heat	66489,91
Fuel	11976,62

Finally, free emissions  $F_{prel,k}$  can be calculated using equation (4) taking in account all proscribed factors.

$$F_{prel,k} = F_{ammonia,k} + (F_{nitricacid,k} - RPA) + F_{h,k} + F_{f,k} \quad (5)$$

Final free emissions are derived inserting values from previous tables into equation (5). First column in table 5. gives correct values as previously described while second and third column combine error 1 or error 2 from free emission calculation from ammonia production in both cases combined with error 1 from nitric acid production and exact values of free emissions from heat and fuel.

**Table 5.** Free emissions from mineral fertilizer production, tons

	corr	Er1	Er2
Amonnia	670654	670654	670654
Nitric acid	9346,7	3455	3455
Fuel+heat	66490	11977	11977
Free emissions $F_{prel,k}$	746490,4	686085,5	686085,5

It is worth of mentioning that other errors are possible although thanks to Excell with minimum probability. Errors introduced here intentionally are solely result of human nature. In case of ammonia production errors made did not affect final result of free emissions. Sounds strange but is already explained. The question is could equation (1) be defined different to signal possible error but this question has to be answered by its authors. Also, should we be worried if errors do not cause any damage? This paper authors' opinion is that procedure has to be followed excluding any mistakes. Remember, this is official methodology taken from official documents.

Further equations are very sensitive to errors especially when used by experienced professional. Any error made in equations (3) and (4) should clearly signalize that it occurred and therefore be spotted.

## 5. Conclusion

Initial impulse for presented analysis was obstacles encountered by authors while preparing previously published papers. In these papers accent was especially on calculating preliminary free emissions in mineral fertilizer production facility as result of activities inside such a facility applying proscribed methodology that included separate calculation of free emissions from subsections of ammonia, nitric and production as well as from fuel. Mathematical apparatus used for calculation is very simple consisting of four basic operations; addition, subtraction, multiplying and dividing. In this simple mathematic very complicated relations inside facility are incorporated. They consist of many mass and

energy flows and their interaction making whole procedure very complicated, additionally because of huge amount of data. Just this huge amount of data is very suitable for making unforced errors. This is the moment when powerful software such as Excel cannot help. It will do as been governed by us. If we make mistake it will do the same. That was the reason for writing this paper. Although, the authors' especially those of first author were higher they soon disappeared and became more realistic. High ambition of paper was fed by calculating of free emissions by ammonia production and stays ambitious, but much more simple dependences of following expressions buried that idea.

However, fulfilled analysis has shown importance of correct calculation and pointed possibility of mistake. In analyzed case error will not cause material damage or casualties but can cause serious financial consequences.

## 6. References

- [1] Regulation on scheme for greenhouse gas emission allowance trading, Official Gazette 89/2020, 2020. (in Croatian)
- [2] Božić, Vlatka; Sutlović, Igor; Raos, Pero; Keran, Laura. CO<sub>2</sub> emissions trading – efficient way to emissions mitigation or new cost?// *Proceedings of 20th Natural Gas, Heat and Water Conference/13th International Natural Gas, Heat and Water Conference*, raos, Pero (ur.). (ISBN 978-953-6048-58-8), Slavonski Brod. University of Slavonski Brod Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, 28.09.-1.10.2022., p. 70-77
- [3] Božić, Vlatka; Sutlović, Igor; Miletić, Damir; Jelena Böhm. Carbon dioxide emissions costs in mineral fertilizers production// *Proceedings of 21st Natural Gas, Heat and Water Conference/14th International Natural Gas, Heat and Water Conference*, raos, Pero (ur.). (ISBN 978-953-6048-58-8), Slavonski Brod. University of Slavonski Brod Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, 27.09.-30.09.2023. p 21-28
- [4] Sutlović, Igor, Božić, Vlatka, Raos, Pero, Sutlović, Ana. Determination of Free Carbon Dioxide Emissions in Mineral Fertilizers Production// *Tehnički vjesnik*, , 31(2024), 3. ISSN 1330-3651



## **Problematika karakterizacije boridnih slojeva** ***Problems in the characterization of boride layers***

**A. Milinović<sup>1,\*</sup>, J. Stojšić<sup>1</sup>, S. Šimunović<sup>1</sup>, M. Margetić Butković<sup>2</sup>, G. Zeba<sup>1</sup>, J. Mijić<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Sveučilište u Slavanskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>2</sup>Saint Jean Industries d.o.o., Slavonski Brod, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [amilinovic@unisb.hr](mailto:amilinovic@unisb.hr)

### **Sažetak**

U radu je diskutirana problematika karakterizacije boridnih slojeva koja se bazira prvenstveno na određivanju prosječne debljine sloja te je u svrhu bolje karakterizacije predložena dodatna metoda bazirana na analizi promjene volumenskog udjela boridne faze po poprečnom presjeku. Kako bi se ukazalo na prednosti i nedostatke ovih metoda, provedeno je boriranje uzoraka čelika C15 i C70W2. Na čelicima su nastali morfološki različiti boridni slojevi gotovo jednake prosječne debljine. Analiza promjene volumenskog udjela boridne faze te na njoj bazirana metoda određivanje promjene tvrdoće po poprečnom presjeku, pokazale su da kod čelika C15 tvrdoća na dubini koja odgovara prosječnoj debljini sloja iznosi oko 460 HV<sub>0,1</sub>, dok je kod čelika C70W2 ta tvrdoća značajno veća i iznosi približno 850 HV<sub>0,1</sub>. Ovo znači da slojevi istih prosječnih debljina, zbog razlike u morfologiji mogu imati potpuno različita svojstva. Istraživanje je pokazalo da je predloženom dodatnom metodom karakterizacije moguće puno preciznije definirati boridne slojeve, i u smislu tvrdoće, i u smislu morfologije.

**Ključne riječi:** boriranje, boridni sloj, karakterizacija, debljina sloja, mikrotvrdoća

### **Abstract**

The article discusses the problem of characterizing boride layers, which is primarily based on the determination of the average layer thickness. For better characterization, an additional method based on the analysis of the change in the volume fraction of the boride phase in the cross-section is proposed. In order to demonstrate the advantages and disadvantages of these methods, boronizing of C15 and C70W2 steel samples was performed. Morphologically different boride layers of almost the same average thickness were formed on the steels. The analysis of the change in the volume fraction of the boride phase and the method used to determine the change in hardness in the cross-section based on this showed that the hardness of the C15 steel at the depth corresponding to the average layer thickness is around 460 HV<sub>0.1</sub>, while this hardness is significantly higher for the C70W2 steel and is around 850 HV<sub>0.1</sub>. This means that layers of the same average

thickness can have completely different properties due to the different morphology. Research has shown that with the proposed additional characterization method, it is possible to define boride layers much more precisely in terms of both hardness and morphology.

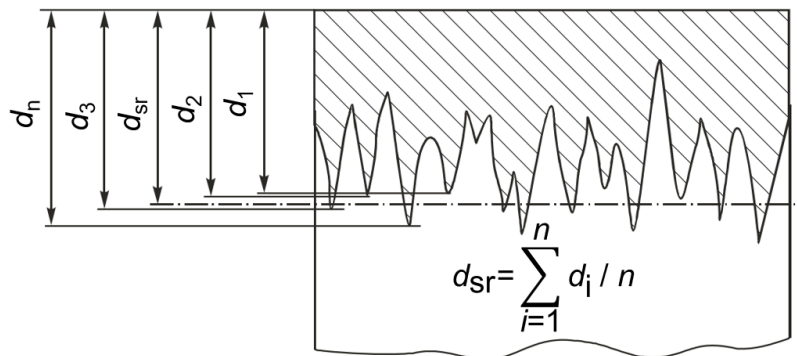
**Key words:** boronizing, boride layer, characterization, layer thickness, microhardness.

## 1. Introduction

Boronizing is a thermochemical treatment carried out with the aim of producing surface layers that increase resistance to abrasive and adhesive wear at room and elevated temperatures. In addition, boronizing increases corrosion resistance in acidic environments, oxidation resistance and resistance to corrosion in molten metals [1-3]. Although boronizing can be carried out on various materials, it is most commonly applied to steels. Boronizing of steel can lead to the formation of single-phase Fe<sub>2</sub>B or two-phase FeB/Fe<sub>2</sub>B layers on the surface. Although the hardness of the Fe<sub>2</sub>B layer is lower compared to the hardness of FeB (about 1600 HV compared to 1800 HV), the formation of a single-phase Fe<sub>2</sub>B layer is desirable. The high fragility of the FeB layer, different thermal expansion coefficients and different residual stresses in the FeB and Fe<sub>2</sub>B layers cause the FeB layer to detach and fall off during operation [4-6].

Apart from their properties, boride layers also differ from other thermodiffusion layers in their appearance, i.e. their morphology. While other layers, e.g. nitrided and cemented, run parallel to the surface, the boride layer has a characteristic sawtooth morphology. The lower the proportion of carbon and/or alloying elements in the steel, the more pronounced the tothing of the layer. The morphology of the layer is important for the behavior of the layer during use - the more pronounced the toothness, the better the boride layer adheres to the substrate [1,2,4].

Thermodiffusion layers are most often characterized by determining the thickness and hardness of the layer. This correlation between layer thickness and layer hardness is so strong that in many thermodiffusion processes one results from the other. For example, the effective depth of cementing and nitriding is determined according to the relevant standards - these are the depths at which the corresponding hardness is achieved. In the case of boronizing, characterization is problematic for two main reasons: firstly, there is no suitable standard, and secondly, the problem arises from the toothed morphology of the layer. The lack of a single standard means that there are different approaches to determining the average layer thickness. The different approaches make it difficult to compare the results. As far as the morphology of the layer is concerned, the toothed appearance of the boride layer makes it difficult to measure, i.e. to determine its average thickness. As already mentioned, there are different approaches to determine the average layer thickness. The most common approach is to determine the average thickness of the layer as the arithmetic mean of the measured lengths from the surface to the surface to the top of the boride teeth (as shown in Figure 1) [7-10].



**Figure 1.** Određivanje prosječne debljine boridnog sloja

Some authors determine the average layer thickness as the mean of the distance from the edge to the approximate center of the tooth length [11], others as ratio of the area of the boride layer and the total length [4,12]. The lack of a uniform standard and the different approaches to determining the average layer thickness make it difficult to compare the results. Matijević has shown in his work that when using different methods to determine the average layer thickness (metallographic line methods, planimetric methods and image analysis methods), the results scatter by up to 35 % [13]. It can be concluded that the characterization of boride layers based on the average thickness of the layer is insufficient, not only because of the scattering of the results, but also because of the fact that based on the data on the average thickness of the layer, nothing can be said about the morphology of the layer, which is of extraordinary importance for the layer quality. The aim of this work is to discuss the problems caused by characterization based solely on the average layer thickness and to analyze the possibility of applying a new additional method based on the volume fraction of the phases to better characterize the boride layer. This analysis was performed on borided samples of C15 and C70W2 steel.

## 2. Materials and methods

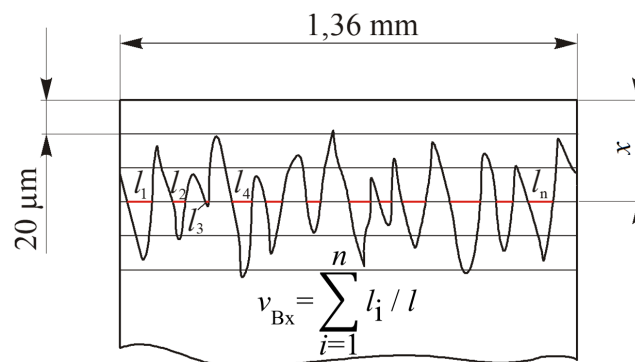
The experimental part was carried out on Ø16x7 mm samples of C15 and C70W2 steels. The chemical composition of these steels is given in Table 1.

**Table 1.** Chemical composition of C15 and C70W2 steels

	C	Si	Mn	P	S	Cu
C15	0,17	0,24	0,38	0,023	0,005	0,04
C70W2	0,72	0,211	0,286	0,014	0,017	-

Before boronizing, the test samples were prepared by grinding with up to 600 grit sandpaper paper. Boronizing was carried out in a solid medium (Durborid 3 powder for drilling) in a laboratory furnace without a protective atmosphere (LHP laboratory furnace for heat treatment). Boronizing was performed at a temperature of 870 °C for 4 hours. After boronizing, the samples were cut in cross-section and prepared for metallographic and

microhardness tests. The preparation consisted of mounting in acrylic resin, grinding with sandpaper up to 1000 grit, polishing with alumina on felt and etching in 3% Nital. The metallographic investigations included microstructural examinations, the determination of the average layer thickness and the determination of the change in the volume fraction of the boride phase in the cross-section. The microstructure was recorded using a Leica DM 2500M light microscope. In addition to the microstructural analysis, the micrographs obtained were also used to determine the average thickness of the boride layer using the metallographic line method, as shown in Figure 1. The metallographic line method was also performed on the obtained micrographs to determine the change in the volume fraction of the boride phase in the cross-section of the layer (Figure 2).



**Figure 2.** Determination of the volume fraction of the boride phase

According to this method, the volume fraction of a phase at a certain depth is calculated as the quotient of the sum of the lengths of all segments running through this phase and the total length of the line. In this way, the volume fraction of the boride phase was determined at every 20 μm distance from the surface.

The test samples were also tested for their microhardness in the cross-section of the layer. The test was performed using the Vickers method with a force of 0.981 N (HV0.1 method). The hardness is determined at every 20 μm distance from the surface. The results of the test of the volume fraction of the boride phase were also used to calculate the hardness, as the hardness depends primarily on the hardness and the proportion of the individual phases. Accordingly, the hardness is determined according to:

$$H_s = v_B \cdot H_B + v_{OM} \cdot H_{Om} \quad (1)$$

Where:

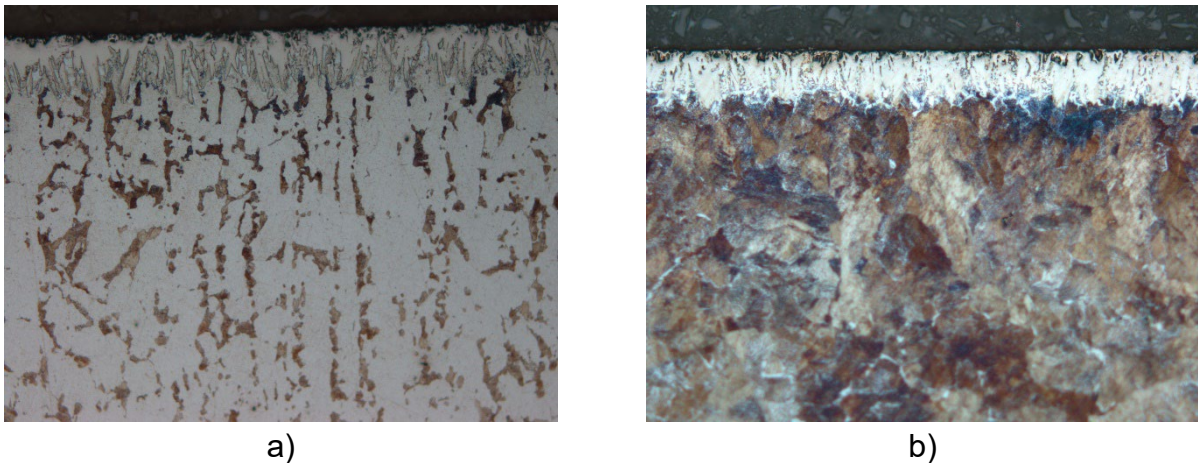
- $H_s$  – total hardness of the layer at the observed depth, HV 0.1
- $v_B$  – volume fraction of the boride ( $Fe_2B$ ) phase at the observed depth, %
- $H_B$  – hardness of the boride ( $Fe_2B$ ) phase, HV 0.1
- $v_{OM}$  – volume fraction of the base material ( $1 - v_B$ ) at the observed depth, %
- $H_{Om}$  – hardness of the base material at the observed depth, HV 0.1.



### 3. Experimental part

#### 3.1. Results and discussion

The microstructure of the layers obtained is shown in Figure 3. It can be seen that toothed Fe<sub>2</sub>B layers have formed on both layers, with the toothiness being more pronounced in C15 steel. This is consistent with studies that have shown that the degree of toothiness decreases as the proportion of carbon and alloying elements increases [1,2,4]. As this is an unalloyed steel, the higher carbon content of the C70W2 steel resulted in less toothed layers.



**Figure 3.** Microstructure of boride layers, magnification 200:1  
a) C15 steel; b) C70W2 steel

Both steels have a pearlite-ferrite microstructure of the base material with a slightly higher proportion of pearlite (visible as a dark phase in Figure 3) directly under the layer (diffusion zone). The reason for the increased pearlite content immediately below the layer is that during the growth of the boride layer, all carbon and alloying elements are pushed inwards, resulting in a higher proportion of carbon (and alloying elements) in the diffusion zone compared to the core. Consequently, a higher carbon content leads to a higher pearlite content directly under the boride layer.

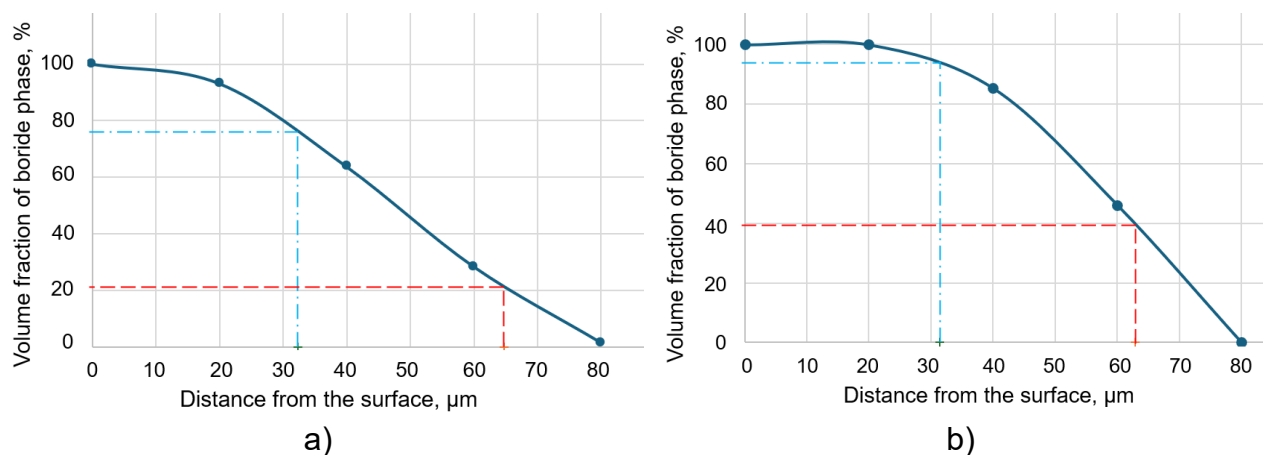
The average thickness of the layer was determined using the metallographic line method shown in Figure 1. It was found that the average thickness of the layer is 65  $\mu\text{m}$  for C15 steel and slightly less for C70W2 steel at 63  $\mu\text{m}$ . This is also in line with previous studies which showed that boronizing steel with a higher content of carbon and/or alloying elements leads to thinner layers [1,2,4,14]. The reason for this behavior is that the carbon and alloying elements, which are pushed inwards during the growth of the layer, form a "barrier" for the further growth of the layer. This "barrier" affects not only the thickness but also the morphology of the layer - the "larger" the barrier, the thinner and less toothed the boride layers are (which is also the case here).

The results of the analysis of the change in the volume fraction of the boride phase in the cross-section of the layer are shown in Table 2 and in Figure 4. It can be seen that the C70W2 steel has a higher proportion of the boride phase with increasing depth than the C15

steel. This is a consequence of the morphology of the boride layers – the layers on the C70W2 steel are not only less toothed, but also more compact than the layers on the C15 steel.

**Table 2.** Cross-sectional change in the volume fraction of the boride phase, %

Distance from the surface, $\mu\text{m}$	0	20	40	60	80
C15	100	93,1	63,7	28,3	1,4
C70W2	100	100	85,4	46,2	0



**Figure 4.** Cross-sectional change in the volume fraction of the boride phase  
a) C15 steel; b) C70W2 steel

Since the hardness is proportional to the hardness and the proportions of the individual phases, the change in the proportion of the boride phase is also reflected in the cross-sectional hardness. The microhardness of the cross-section was calculated according to expression (1). The average hardness of the  $\text{Fe}_2\text{B}$  layer was 1557 HV0.1 and this value was used as the  $H_B$  value in expression (1). As for the hardness of the base material in the diffusion zone ( $H_{OM}$ ), these values varied with depth due to the increased carbon content relative to the core, and the values used for the calculation are shown in Table 3. It should be noted that the hardness of the core (base material) is 128 HV0.1 for C15 steel and 254 HV0.1 for C70W2 steel.

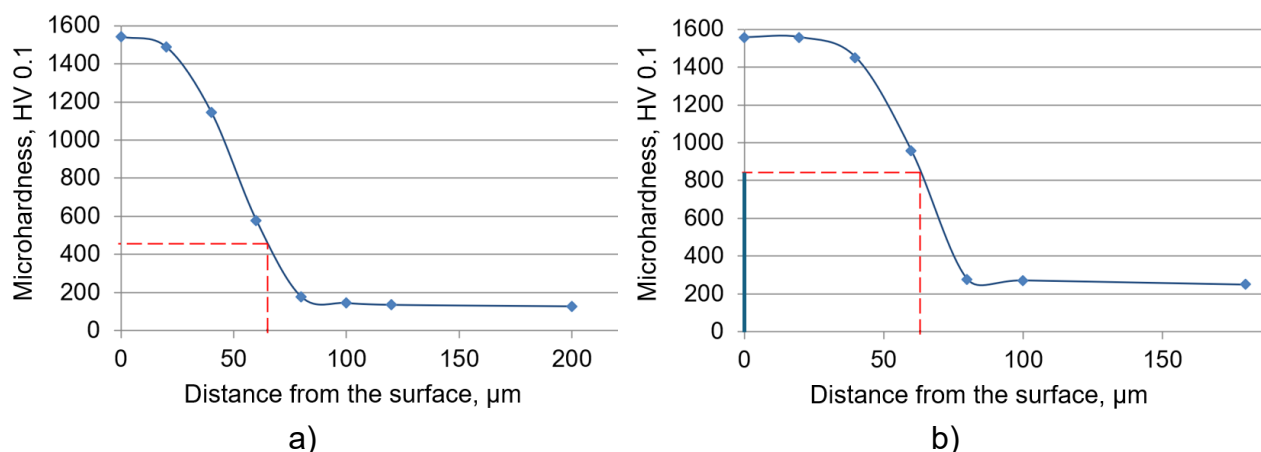
**Table 3.** Microhardness of the base material in the diffusion zone, HV 0.1

Distance from the surface, $\mu\text{m}$	20	40	60	80	100	120
C15	765	454	200	158	146	136
C70W2	-	820	437	278	272	250

Based on the given data and expression (1), the microhardness at a distance of every 20  $\mu\text{m}$  from the surface was calculated and the results are shown in Table 4 and Figure 5. As can be seen, the microhardness of the cross-section of the C70W2 steel is higher than the hardness at the same depths for C15 steel at all depths (except at the depths where the layer is compact, i.e. the proportion of boride phase is 100 %).

**Table 4.** Cross-sectional microhardness of the surface layer, HV 0.1

Distance from the surface, $\mu\text{m}$	0	20	40	60	80	100	120
C15	1557	1487	1146	579	178	146	136
C70W2	1557	1557	1450	955	278	272	250



**Figure 5.** Cross-sectional microhardness of the surface layer  
a) C15 steel; b) C70W2 steel

### 3.2. Advantages of an additional characterization based on the analysis of the volume fractions of the boride phase over the cross-section

One of the disadvantages of the classical method of characterizing boride layers, which is primarily based on determining the average layer thickness, is that it can lead to the false conclusion that extremely high hardnesses are present at these depths (i.e. hardnesses corresponding to the  $\text{Fe}_2\text{B}$  phase). Another drawback is that it says nothing about the morphology of the layer, which is crucial to its quality. These shortcomings are highlighted in the results of this study. Using an additional characterization method based on volume fractions and a hardness determination method based on it, it is shown that the properties of the layers obtained on C15 and C70W2 steels are significantly different, although they are layers with almost the same average thickness (65 vs. 63  $\mu\text{m}$ ). Although the average hardness of the  $\text{Fe}_2\text{B}$  phase is 1557 HV0.1, the hardness of the surface layer is significantly lower at the depths corresponding to the average thickness of the layer due to the lower proportion of the boride phase. Figure 4 shows the change in the volume fraction of the boride phase over the cross-section of the layer for both steels, with the depths corresponding to the average layer thickness marked with a red dashed line. From the diagram in Figure 4a, it can be seen that at the depth corresponding to the average layer thickness of the C15 steel, about 21 %  $\text{Fe}_2\text{B}$  phase is present. Figure 4b shows that this proportion is higher for C70W2 steel, at around 40 %. The shapes of the curves in Figure 4 indicate the different morphology of the boride layers on these two steels. The fact that the C70W2 steel has a greater proportion of the boride phase with increasing depth than the

C15 steel indicates that a more compact, i.e. less toothed, layer has formed on the C70W2 steel. The less toothed the layer is, the wider and denser the teeth are, which leads to a higher proportion of the boride phase. These proportions of the boride phase are also reflected in the hardness. In the diagrams in Figure 5, the depths corresponding to the average thickness of the layer are marked with a red dashed line. From the diagram in Figure 5a) it can be seen that for C15 steel, the hardness at the depth corresponding to the average layer thickness is well below 1557 HV0.1 and is approximately 460 HV0.1. For C70W2 steel, the diagram in Figure 5b) shows that a greater proportion of the boride phase at a depth corresponding to the average layer thickness leads to a higher hardness, which in this case is around 850 HV0.1. These observations are consistent with studies that have shown that in low carbon steel at depths corresponding to the average layer thicknesses, the proportions of the boride phase are even lower, ranging from 1 to 18% [15]. These low proportions are the result of the formation of extremely toothed boride layers and indicate that the hardness at these depths can only be slightly higher than the hardness of the base material.

In the diagrams in Figure 4, the blue line (dash-dot line) indicates the depth corresponding to half the average thickness of the layer. It can be seen that about 75 % of the boride phase is present at these depths of the layer on the C15 steel, while this proportion is significantly higher on the C70W2 steel (about 95%). This would mean that the layer on the C70W2 steel at "50% layer wear" consists almost exclusively of the extremely hard Fe<sub>2</sub>B phase.

## 5. Conclusions

Based on the results of this investigation, the following conclusions can be drawn:

- Boronizing of both steels resulted in the formation of toothed boride layers, with the toothiness being more pronounced in steel C15. The thickness of the layers was approximately the same, with a slightly thinner layer forming on the C70W2 steel.
- Analysis of the change in the volume fraction of the boride phase over the cross-section of the layer showed that the proportion of the boride phase is higher at practically all depths in C70W2 steel. The morphology of the layer can be inferred from the appearance of the curves, i.e. that a more compact, i.e. less toothed, layer has formed on the C70W2 steel.
- Larger proportions of the boride phase per cross-section of the layer led to a higher hardness in C70W2 steel. The hardness of the surface layer at depth, which corresponds to the average thickness, is 460 HV0.1 for C15 steel and 850 HV0.1 for C70W2 steel.
- By applying an additional method based on volume fractions, it is possible to characterize the layer more precisely in terms of morphology and hardness.

## 6. References

- [1] Mebarek, B.; Keddou, M. A fuzzy neural network approach for modeling the growth kinetics of FeB and Fe<sub>2</sub>B layers during the boronizing process // *Matériaux & Techniques*, 106(2018), 6; 603.

- [2] Carrera-Espinoza, R.; Figueroa-López, U.; Martínez-Trinidad, J.; Campos-Silva, I.; Hernández-Sánchez, E.; Motallebzadehd, A. Tribological behavior of borided AISI 1018 steel under linear reciprocating sliding conditions // *Wear*, 362–363 (2016), 15; 1-7
- [3] Kaouka, A.; Allaoui, O.; Keddad, M. Growth kinetics of the boride layers formed on SAE 1035 steel // *Matériaux & Techniques*, 101(2013), 7; 705.
- [4] Karakaş, M.S.; Günen, A.; Kanca, E.; Yilmaz, E. Boride layer growth kinetics of AISI H13 steel borided with nano-sized powders // *Archives of Metallurgy and Materials*, 63(2018), 1; 159-165.
- [5] Genel, K. Boriding kinetics of H13 steel // *Vacuum*, 80(2006), 5; 451–457.
- [6] Kul, M.; Danacı, I.; Gezer, Ş.; Karaca, B. Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel // *Materials Letters*, 279(2020), 15; 128510.
- [7] Kayali, Y. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace // *Vacuum*, 121(2015), 129-134.
- [8] Campos, I.; Ramírez Sandoval, G.; Figueroa, U.; Martínez, J.; Morales, O. Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe<sub>2</sub>B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels // *Applied Surface Science*, 253(2007), 7; 3469–3475.
- [9] Ruiz-Trabolsi, P.A.; Velázquez, J.C.; Orozco-Álvarez, C.; Carrera-Espinoza, R.; Yescas-Hernández, J.A.; González-Arévalo, N.E.; Hernández-Sánchez, E. Kinetics of the boride layers obtained on AISI 1018 steel by considering the amount of matter involved // *Coatings*, 11(2021), 2; 259.
- [10] Ortiz-Domínguez, M.; Flores-Rentería, M.Á.; Keddad, M.; Elias-Espinosa, M.; Damián-Mejía, O.; Aldana-González, J.I.; Zuno-Silva, J.; Medina-Moreno, S.A.; González-Reyes, J.G. Simulation of growth kinetics of Fe<sub>2</sub>B layers formed on gray cast iron during the powder-pack boriding // *Materials and Technologies*, 48(2014), 6; 905-916.
- [11] Panda, J.N.; Wong, B.C.; Medvedovski, E.; Egberts, P. Enhancement of tribo-corrosion performance of carbon steel through boronizing and BN-based coatings // *Tribology International*, 153(2021); 106666.
- [12] Yu, L.G.; Chen, X.J.; Khor, K.A.; Sundararajan, G. FeB/Fe<sub>2</sub>B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics // *Acta Materialia*, 53(2005), 8; 2361–2368.
- [13] Matijević, B. Toplinsko difuzijski proces boriranja čelika. Master's Thesis, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb, Zagreb, Croatia, 1992.
- [14] Campos, I.; Ramírez Sandoval, G.; Figueroa, U.; Martínez, J.; Morales, O. Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe<sub>2</sub>B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels // *Applied Surface Science*, 253(2007), 7; 3469–3475.
- [15] Milinović, Andrijana; Stojić, Josip; Kladarić, Ivica; Matijević, Božidar. Evaluation of boride layers on C70W2 steel using a new approach to characterization of boride layers // *Materials*, 15(2022), 11; 3891.



# Liquefied natural gas is a mixture of gases *Ukapljeni prirodni plin je mješavina plinova*

S. Franjić

E-mail:sinisa.franjic@gmail.com

## Abstract:

Liquefied natural gas (LNG) is purified natural gas that turns into a liquid state by cooling for easier transportation. In international traffic, the abbreviation for liquefied natural gas is LNG, according to the English name liquefied natural gas. Liquefied natural gas occupies about 1/600 of the volume of natural gas in the gaseous state. It is colorless and odorless, non-toxic and non-corrosive. The reasons for the increase in use, and with it transport, are multiple. Its most often mentioned advantages over other energy sources are significantly less environmental pollution, fuel with high heating power and possible large deposits reserves.

**Keywords:** LNG, Natural Gas, Consumption, Transport, Markets

## Sažetak:

Ukapljeni prirodni plin (UPP) jest pročišćeni zemni plin koji se rashlađivanjem pretvara u tekuće stanje zbog lakšeg prijevoza. U međunarodnom prometu, kratica za ukapljeni zemni plin je LNG, prema engleskom nazivu liquefied natural gas. Ukapljeni prirodni plin zauzima oko 1/600 volumena prirodnog plina u plinovitom stanju. Bezbojan je i bez mirisa, netoksičan i ne korodira. Razlozi porasta upotrebe, a s time i prijevoza, su višestruki. Njegove najčešće spominjane prednosti nad ostalim energentima su znatno manje onečišćenje okoliša, gorivo visoke ogrijevne moći i moguće velike rezerve nalazišta.

**Ključne riječi:** LNG, Prirodni plin, Potrošnja, Transport, Tržište

## 1. Introduction

Gas is one of the most important energy sources in the global heat and energy market. Due to the large gas reserves, the important role of gas will certainly not change in the coming decades.

Natural gas is a mixture of methane (more than 90 mole percent) with smaller amounts of ethane, propane and higher hydrocarbons, and may also contain carbon dioxide, hydrogen sulfide (such gas is called sour), nitrogen, and sometimes helium and lives According to the proportion of heavier hydrocarbons, they differ: dry gas, whose proportion is insignificant, and wet gas or wet gas, whose proportion of heavier hydrocarbons is greater and significant from gas and gas condensate reservoirs. Natural gas has limited possibilities as a fossil fuel.

It is estimated that natural gas reserves could last another hundred years at current usage levels. The biggest problems with gas is that the proportion of methane in it varies from country to country, so for example in Russia the proportion of methane in natural gas is around 98%, while in the Netherlands it is 80% to 85%.

LNG is natural gas which has been condensed into a liquid. Natural gas can be transformed into a liquid state by the application of pressure or extreme cooling or a combination of both [1]. Due to the hazards associated with the application of extreme pressure, the LNG industry adopts a cooling process which operates at atmospheric pressure. LNG is predominantly methane, with small proportions of ethane, propane, butane and pentanes. The resulting liquid is chemically inert in respect of most substances and will not burn or explode. At ambient temperatures LNG boils away leaving no residue, and any LNG which transforms into gaseous state is about half the density of air and consequently rises and disperses. The transformation of methane gas into liquefied methane yields a volume reduction of approximately 600 to one. This super-cooled liquid can be stored cryogenically in insulated tanks constructed of special steel (as normal steel cannot withstand the low temperature of LNG) or aluminium, which can then be installed on ocean-going vessels for transportation.

## **2. The Energy Development Strategy**

The Energy Development Strategy sets guidelines for the implementation of activities to achieve a sustainable, reliable and flexible energy system through strategic management and market exploitation to achieve safe operation. and affordable energy supply, limiting greenhouse gas emissions from the energy sector, more efficient energy use, and development and implementation of environmentally sustainable energy technologies [2]. Every country should have an energy development strategy because it is a fundamental document that determines the rules of the game in the energy sector.

The goal of the strategy is to replace electricity for space heating and domestic water production with other types of energy: solar energy, biomass, natural gas and liquid gas in areas far from the natural gas network. This purpose does not apply to the use of electricity for heating and hot water production with heat pumps. In transport, forms that reduce energy intensity are promoted.

## **3. Energy Efficiency**

Despite the increase in energy efficiency, the further development of the economy requires an increase in energy consumption, which means that one of the basic conditions for economic growth and development is fulfilled [3]. At this point, it should be emphasized that the main role of the state in this sense is the approval, implementation and control of energy policy. The main instruments of energy policy implementation are regulation of the energy sector, adoption of energy efficiency measures, consumer protection, including the cost of external effects of energy prices, etc.

The efficient use of energy in production, transmission and immediate consumption is the basis of development guidelines for all sectors of the energy system. In the field of oil, oil

derivatives and natural gas production, energy efficiency can be seen in the modernization of refineries and the use of advanced technologies in the disposal of oil fields and gas deposits. In the energy industry, energy efficiency requires the implementation of more efficient energy conversion technologies, such as advanced coal combustion technologies, high-efficiency gas-fired power plants, and cogeneration, as well as reducing transmission and distribution network losses, site-friendly. promotion of decentralized power generation. In heat energy production, the development of centralized heat systems aims to improve the efficiency of energy conversion, implementation of cogeneration equipment and reduction of losses of heat energy distribution, decentralized energy production and use of renewable energy sources.

#### **4. Natural Gas**

Natural gas is a fossil energy source that was formed deep underground. Natural gas contains a large number of different compounds. Methane, a compound with one carbon atom and four hydrogen atoms (CH<sub>4</sub>), makes up most of the composition of natural gas. Natural gas also contains smaller amounts of natural gas liquids (NGLs, which are also hydrocarbon gas liquids) and non-hydrocarbon gases such as carbon dioxide and water vapor. We use natural gas as an energy source, fuel and for the production of various materials and chemicals.

Natural gas is not toxic, it is lighter than air (density of natural gas is about 0.68 kg/Sm<sup>3</sup> compared to air density of 1,293 kg/Sm<sup>3</sup>). We usually measure it in standard m<sup>3</sup> (One Sm<sup>3</sup> corresponds to the amount of gas occupying 1 m<sup>3</sup> of space at a pressure of 1,01325 bars and a temperature of 15°C).

It is important to distinguish natural gas from LNG (LNG or propane-butane). LNG is produced by processing crude oil and is stored in tanks and gas cylinders. Unlike natural gas, LNG is heavier than air, so the rooms where it is used must be carefully ventilated. Its main characteristics are flammability and explosiveness, but only when mixed with air and exposed to flame. The ignition temperature is 640 °C. It burns with a bluish flame, and if there is not enough oxygen during combustion, the flame acquires a yellowish to reddish color. When it burns, it releases a large amount of energy. Depending on the proportion of methane and other hydrocarbons, 1 m<sup>3</sup> of natural gas burns about 9 to 12 kWh of gas energy.

Natural gas burns without harmful combustion products, soot, ash and a very small amount of carbon monoxide and sulfur dioxide, which is one of the most ecologically clean energy sources.

Natural gas is a competitive substitute for liquid fuels on the market, and the replacement of liquid fuels with renewable energy sources must be strongly encouraged by various means [4]. Households and services will continue to use liquid fuels, especially liquefied petroleum gas. LNG and fuel oil also cover the peak loads of the natural gas supply system for consumers in the event of a natural gas supply interruption, which balances the imbalance in the natural gas supply system.



## 5. Liquefied Natural Gas

Liquefied natural gas (LNG) is natural gas that becomes liquid (liquefied) after cooling to about -160 °C. The volume of natural gas in the liquid state is about 600 times smaller than in the gaseous state. This liquefaction process allows natural gas to be transported to places where natural gas pipelines cannot reach.

When natural gas pipelines are not possible or available, LNG is a means of delivering natural gas from production areas to consumer markets. The reduction in volume makes transporting long distances much more economical.

LNG liquefaction and export facilities receive natural gas through pipelines and liquefy it for transport on special LNG ships or tankers. LNG is transported by tankers with refrigeration (cryogenic) tanks. LNG is also transported in smaller containers that can be placed on ships and trucks. LNG vessels can be more than 300 meters long and the minimum water depth must be more than 12 meters when fully loaded. They must also be double-diaphragm and specially designed to withstand the low temperatures of LNG.

At import terminals (regasification receiving terminals), LNG is unloaded from ships and stored in cryogenic tanks before returning to its gaseous state. After regasification, natural gas is transported by gas pipelines to end users - industry, gas plants, and private and commercial customers.

Extracting the natural gas from the ground is the first step in the LNG value chain [5]. The gas supply that comes from the production field is called “feed” gas and the feed gas is first sent to the onshore processing plant for treatment prior to liquefaction. It is important to note that raw natural gas has to be purified before it is suitable for use by consumers. While the natural gas used by consumers is almost entirely methane, natural gas is associated with a variety of other compounds and gases such as ethane, propane, butane, carbon dioxide, and sulfur, as well as oil, water, and other substances. All of these must be removed prior to the liquefaction process. Because the composition of natural gas can vary widely depending on the gas field, pipeline companies and LNG buyers typically specify allowable ranges of components and heating values. In particular, the specifications for higher heating value (HHV) and gas interchangeability vary significantly worldwide, as do the LNG characteristics from worldwide sources.

Historically, LNG product specifications were not major plant design issues since plant designs were based on long-term contracts with specified buyers so there was little need for flexibility in the plant designs. This situation has changed in recent years as LNG trade has become more global, with owners of liquefaction plant often targeting more than one market. Moreover, the growing spot market for LNG provides more opportunities for buyers and sellers who have the ability to be flexible on product specifications. As a result, various technical solutions have been developed for conditioning LNG on liquefaction and receiving ends. For example, LNG extraction is a common method for adjusting LNG HHV downward on both the receiving and liquefaction ends. Nitrogen injection is also used in existing terminals to reduce HHV.

In the last few decades, LNG has become an important part of the natural gas value chain in Europe and East Asia [6]. More recently, LNG imports by the United States have been accelerating. LNG and its impact on natural gas pipelines merit mention.

LNG import terminals temporarily store the LNG until it is regasified, warmed back up to normal pipeline temperatures, and delivered into transmission lines as a vapor. At first blush, handling LNG in a natural gas line would seem to present no liquids problems. After all, when LNG is created at its origin, the gas has to be cooled to  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  to get it into the liquid state. In the process, long before that temperature is reached, the ethane, propane, butane and heavier molecules liquefy and could easily have been removed from the natural gas stream. But LNG often comes from stranded gas, a term that implies the gas production is located in some remote place, far from energy markets. If that is true, the market for NGL may be equally isolated. The owner of the LNG operation may be interested in leaving the NGL in the LNG as a means of transporting it cheaply to a market or increasing its BTU content. Some LNG can even be spiked with extra propane and butanes because the destination market pays a premium for the liquids. In this case, the liquids-laden LNG may pose the same liquids problems covered earlier. For this reason, LNG specifications and quality are receiving considerable attention.

## 6. Global Consumption

Global consumption of natural gas has been steadily increasing over recent decades [7]. In the period 2000–2019 alone, consumption increased by nearly 60% from 2,400 billion cubic metres (bcm) to over 3,900 bcm. Despite increased global consumption, documented natural gas reserves are also growing as a result of new technology developments and discoveries of new gas fields. During the period 2000–2019, the volume of documented natural gas reserves increased from 138,900 bcm to 198,800 bcm, of which nearly 50% are located in the Russian Federation, Iran and Qatar. At the same time, the share of natural gas in global primary energy consumption is increasing. Analysing the process of consumption growth, we observe that natural gas consumption is growing fastest in the Middle East, Asia–Pacific and Africa. The fastest growth in the last two decades has occurred in global exports of liquefied natural gas. Between 2000 and 2019, international trade in liquefied natural gas increased from 140 bcm to 485 bcm, i.e. more than threefold, with particularly rapid growth over the past five years.

Although the SARS CoV-19 pandemic, i.e. COVID-19, has contributed to a decline in gas consumption globally in 2020, the annual global LNG trade is expected to increase to 585 bcm by 2025. The pandemic contributed to a correction of the IEA's (International Energy Agency) forecasts reducing the assumed average annual growth rate from 1,8% to 1,5% by 2025, which means a loss of 75 bcm of natural gas growth in this period. This underlines the strategic importance of LNG in enhancing the security of supply to end users, and contributes to a competitive natural gas market in an environmentally sustainable manner. Discovery of further sources of natural gas in places remote from the existing and planned routes of transmission pipelines, as well as the development of maritime transport have contributed to the dynamic development of the global liquefied natural gas market.

The development of global trade in liquefied natural gas is determined by the number of countries with energy infrastructure capable of exporting and importing it. The availability of liquefied natural gas on the global market, which is being increasingly liberalised, is steadily increasing. LNG supply contracts are increasingly flexible, they are concluded for a short period of time, and the raw material price is indexed to the price of gas hubs. This means that the process of development of the global LNG market is similar to the way the global oil trade has developed.

## **7. Transport**

Natural gas in a great many ways represents a unique case study in the International Relations context [8]. Natural gas as an energy commodity has unique characteristics. Because it is a gas, not a liquid or a solid product, it has historically been delivered through pipelines in most interstate cases. This development has set the framework for long-term contracts between states and companies. Previously, concerns over supply security have dampened the success story of natural gas for years. However, due to the emergence of fundamental changes in the market owing to liquefied natural gas (LNG), which is mainly transported via ship and unconventional gas, a global, or at least a more interconnected system of natural gas markets emerges out of the formerly distinct interregional markets. However, the peculiar nature of natural gas-as it is diffusible in its natural state and not a complex liquid solution like oil-makes the value chain and especially the transportation of the molecules a more difficult issue, compared to oil. Gas pipelines dominate the global supply system, but pipelines come with their own strategic and economic implications, as pipelines, once built from the supply region to the demand center, cannot be rerouted. This leads to fixed political and economic dependencies, and crossborder transit through third countries comes with additional legal, geostrategic, and therefore political consequences. Undoubtedly, natural gas trade and transportation is more complex compared to other commodities as additional forces and risks are associated. Out of the International Relations and international bargaining perspectives, natural gas trade is a special case where domestic-international linkages expose national interests and are set for a long period of time.

## **8. Markets**

Most long views incorporate increased global natural gas consumption for decades ahead [9]. Hundreds of billions of dollars invested in gas and liquefied natural gas (LNG) supply chains and gas-consuming infrastructure every year, backed by long-term contracts, support these expectations. There are few good, cost-effective options for balancing electricity provided by intermittent renewable energy sources. However, much less is said about the use of natural gas as “a,” or perhaps “the,” baseload fuel for electric power generation although at one time it was almost a generic assumption. For that matter, not much is said about natural gas as “a,” or “the,” key baseload fuel source for other applications, like

transport, or even petrochemicals, in spite of the tremendous advantage natural gas molecular feedstocks have in the U.S. and the importance of materials to the global economy. Notwithstanding relative abundance and low cost, and regardless of its critical importance as a primary heating fuel in colder climates, natural gas is most often discussed as an incremental fuel source, one that ultimately would be replaced by vast additions of renewable energy capacity, hydrogen, and electrification.

Expanding the role of natural gas even as a vital incremental fuel source faces many challenges, more so in regions and locations where infrastructure is weak and “rules of the game” do not provide clarity for risky investment. Value creation across the natural gas supply chain requires expansive networks of pipelines of different sizes and specifications to transport natural gas from production areas to consumption centers. Effective natural gas systems need production gathering at the field level and processing to separate out various molecules so that mostly methane can be supplied to pipeline networks and other molecules (natural gas liquids) can be monetized. All natural gas markets benefit from storage facilities for methane and natural gas liquids (NGLs) to balance daily and seasonal fluctuations in demand. For direct use of gas, effective natural gas systems incorporate local distribution companies to move methane to factories, businesses, and homes via smaller diameter pipelines. All direct methane and liquid petroleum gas (LPG) consumers need appropriate appliances. If customers will receive natural gas as imports via pipelines or as liquefied natural gas (LNG), they will need pipelines and LNG receiving terminals (along with supporting LNG supply chains). Natural gas infrastructure is expensive to build, maintain, and operate. Connecting customers of different sizes and metering their consumption can represent a large portion of end-user prices.

## **9. Energy Transition**

The energy transition is aiming for an eventual replacement of fossil fuels with renewable low-carbon resources [10]. The additional impact of these changing dynamics in the realm of energy security will create further economic and political challenges for gas-exporting states. To illustrate, due to the gradual decrease of natural gas demand under low-carbon scenarios, between 2020 and 2050, natural gas traded as LNG is projected to decrease 60 per cent, and gas trade via pipeline is expected to fall by 65 per cent. This can reach up to a 75 per cent fall in annual per capita income from oil and natural gas in export-dependent countries by 2030. Furthermore, the vulnerability of states dependent on natural gas exports is far beyond their fossil fuel revenues and socio-economic structures attached to their hydro-carbon dependent systems, since they have heavy investments in human capital, and in the extraction, production and distribution of natural gas. Under the zero-carbon scenarios, the expected decrease of natural gas demand can therefore result in spillover implications for export-dependent countries, including socio-political turmoil.

These factors and the role of natural gas as a temporary transition technology which ideally foresees a decreasing share of natural gas in the energy mix, have already led some gas exporters to diversify their economies away from natural gas, shifting their extractive revenues into alternative energy technologies such as hydrogen, wind or solar.

On the other hand, if these suppliers are to dominate the changing map of the global gas market, which is projected to shift into emerging markets (especially to Asia), they can be still required to invest in new networks, new extraction capacities and technologies, which risk locking them into natural gas financially and technologically, by also delaying their own decarbonization and prolonging the existence of natural gas in the global energy mix, as the previous section has already addressed. This creates a dilemma for natural gas exporters to invest or not into a technology considered to be only a transition fuel in the short and medium terms.

## 10. Conclusion

Natural gas placed in LNG plants will be treated by removing water, hydrogen sulfide, carbon dioxide and other components that will freeze under the low temperatures necessary for storage. LNG is a mixture of gases dominated by methane, and smaller percentages of ethane, propane and butane are found in the mixture. According to its chemical composition, methane is a saturated hydrocarbon with one carbon atom and four hydrogen atoms.

## 11. Literature

- [1] Dyer, E.; Reinbott, D.; Williams, M.: Liquefied natural gas in Picton-Turbervill, G: Oil and Gas - A Practical Handbook, Globe Business Publishing Ltd, 2009, pp. 113.
- [2] Franjić, S.: Gospodarenje plinom i zaštita potrošača u Republici Hrvatskoj // PLIN2014
- [3] Franjić, S.: Obnovljivi izvori energije i plin // PLIN 2022
- [4] Franjić, S.: Energija i pravo, GlobeEdit, 2023, pp. 32
- [5] Sakmar, S. L.: Energy for the 21st Century - Opportunities and Challenges for Liquefied Natural Gas (LNG), Edward Elgar Publishing Limited, 2013, pp. 33. – 34.
- [6] Miesner, T. O.; Leffler, W. L.: Oil & Gas Pipelines in Nontechnical Language, PennWell Corporation, 2006, pp. 92.
- [7] Ruszel, M.: The Development of Global LNG Exports in Liuhto, K.: The Future of Energy Consumption, Security and Natural Gas - LNG in the Baltic Sea Region, Palgrave Macmillan, 2022, pp. 1. – 2.
- [8] Kuhn, M.: Enabling the Iranian Gas Export Options - The Destiny of Iranian Energy Relations in a Tripolar Struggle over Energy Security and Geopolitics, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, pp. 30
- [9] Foss, M. M.; Gülen, G.: Building Sustainable Natural Gas Markets in Foss, M. M.; Mikulska, A.; Gülen, G.: Monetizing Natural Gas in the New “New Deal” Economy, Palgrave Macmillan, 2021, pp. 363. – 364.
- [10] Sever, S. D.: Natural Gas and Energy Security in Olawuyi, D. S.; Pereira, E. G.: The Palgrave Handbook of Natural Gas and Global Energy Transitions, Palgrave Macmillan, 2022, pp. 109. – 110.

# Korozijski utjecaj bioplina na dijelove bioplinskog postrojenja

## *The corrosive effect of biogas on parts of the biogas plant*

I. Vidaković<sup>1,\*</sup>, G. Heffer<sup>1</sup>, G. Pačarek<sup>1</sup>, V. Tadić<sup>1</sup>, K. Šimunović<sup>2</sup>, M. Nadarević<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

<sup>2</sup> Strojarški fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [ividakovic@fazos.hr](mailto:ividakovic@fazos.hr)

### Sažetak

Na temelju dostupnih literaturnih izvora i provedenog istraživanja na bioplinskom postrojenju, u radu su opisani uzroci pojave korozije na metalnim dijelovima bioplinskog postrojenja. Tehnologija proizvodnje bioplina pogodna je za razvoj korozije, pri čemu prisutnost sumpora u bioplina ima najveći utjecaj na razvoj korozije te je stoga potrebno njegovu koncentraciju držati na što nižoj mogućoj mjeri. Također, u radu su navedene metode koje se primjenjuju u svrhu zaštite od korozije metalnih dijelova bioplinskog postrojenja.

**Ključne riječi:** bioplin, korozija, bioplinsko postrojenje, nehrđajući čelik

### Abstract

Based on the available literature sources and the investigations carried out in the biogas plant, this article describes the causes of corrosion of the metal parts of the biogas plant. The technology of biogas production is suitable for the development of corrosion, whereby the presence of sulfur in biogas has the greatest influence on the development of corrosion and it is therefore necessary to keep its concentration as low as possible. The methods used to protect the metal parts of the biogas plant from corrosion are also described.

**Key words:** biogas, corrosion, biogas plant, stainless steel

### 1. Uvod

Bioplin je prema [1] zapaljivi plin bez boje, mirisa koji podsjeća na pokvarena jaja (iako je iz njegovog sastava uklonjen H<sub>2</sub>S). Sastav bioplina je mješavina plinova metana, ugljikova dioksida, dušika, vodika i vodikovog sulfida [2]. Bioplin je ekološki prihvatljiv plin, a relativno je povoljan energent; može se koristiti kao pogonsko gorivo za proizvodnju električne i



toplinske energije te kao gorivo u transportu. Kao sirovina za proizvodnju bioplina koriste se životinjski otpad, stajski gnoj, otpadna jestiva ulja, prehrambeni proizvodi koji nisu više za uporabu, kanalizacijski mulj i sl. [3]. Bioplin nastaje procesom anaerobne digestije u kojemu se pod posredstvom različitih anaerobnih mikroorganizama u anaerobnim uvjetima (bez prisutnosti kisika) razlažu kompleksni organski spojevi do jednostavnih elemenata. Uz ranije spomenuti bioplin, završni proizvod anaerobne digestije je i digestat, odnosno ostatak organskog materijala koji se može koristiti (u krutom ili tekućem stanju) kao visoko hranjivo organsko gnojivo.

Kao i kod većine industrijskih sustava, neki elementi bioplinskog postrojenja, mogu biti izloženi djelovanju korozije. Korozija u tehničkom smislu predstavlja nepoželjno trošenje konstrukcijskih metala kemijskim djelovanjem okoline. Kemijskim procesom između barem jedne faze ili komponente metala i barem jedne komponente okoline događa se korozija u neelektrolitima ili kemijska korozija [4]. Procesi fermentacije i oksidacije koje koriste anaerobni digestori bioplinskog postrojenja (betonski ili čelični) pogoduju procesu korozije, kako u plinovitoj, tako i u tekućoj fazi te kao takvi mogu prouzročiti značajna oštećenja na metalnim dijelovima bioplinskih postrojenja.

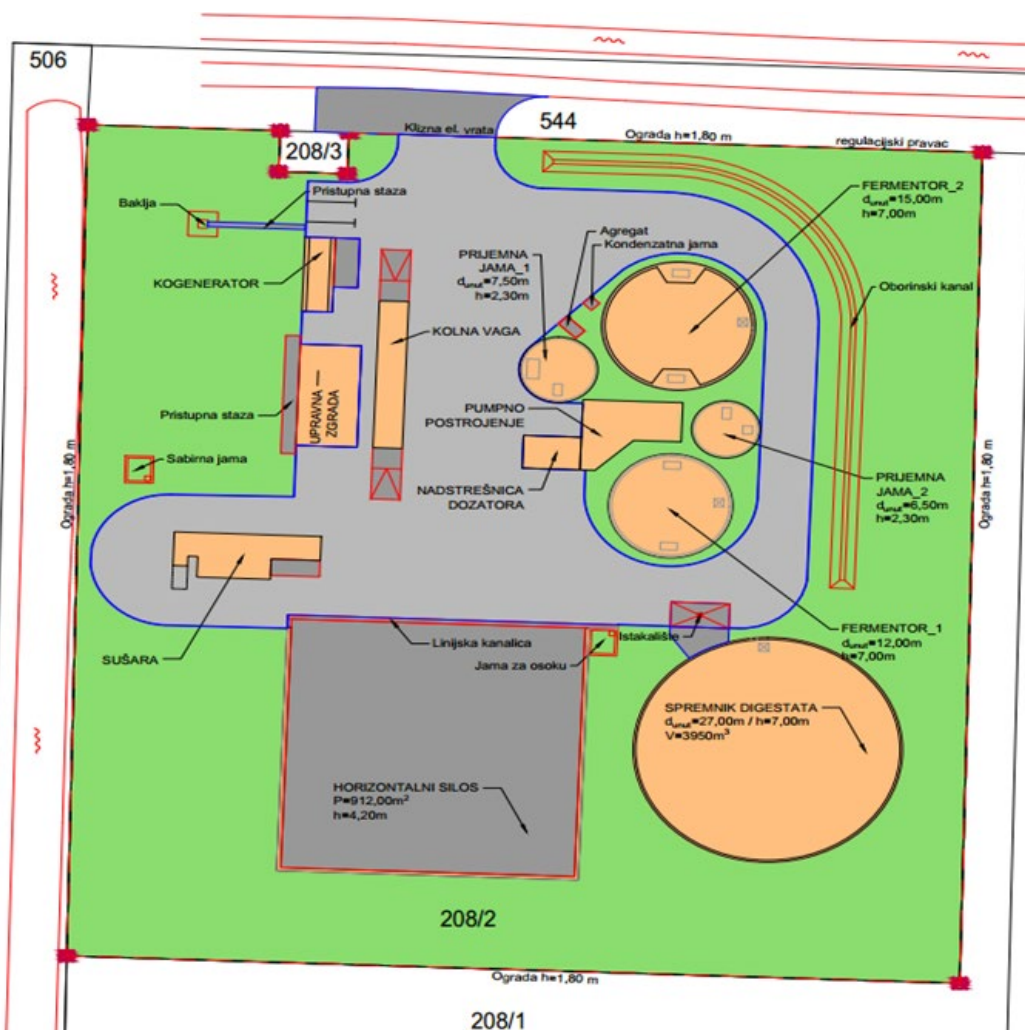
Cilj ovog rada je na temelju dostupnih literaturnih izvora i praktičnih primjera analizirati uzroke nastanka korozije, kao i vrste korozije koje se javljaju na metalnim dijelovima bioplinskog postrojenja te utvrditi djelotvorne metode zaštite od korozije, s ciljem sprječavanja nastanka korozije ili smanjenja troškova održavanja nastalih uslijed koruzijskog djelovanja.

## 2. Materijal i metode

### 2.1. Bioplinsko postrojenje „Hrastin“

Dio provedenih istraživanja obuhvaćenih ovim radom provedeno je na bioplinskom kogeneracijskom postrojenju „Hrastin“ u vlasništvu tvrtke MICO d.o.o. iz Osijeka. Kogeneracijska jedinica postrojenja nazivne je električne snage od 355 kW, dok očekivana godišnja (bruto) proizvodnja električne energije iznosi oko 2 500 000 kWh. Istovremeno kogeneracijska jedinica proizvodi i toplinsku energiju u očekivanoj količini od oko 2 950 000 kWh godišnje. Od proizvedene toplinske energije, oko 300 000 kWh godišnje se potroši za potrebe postrojenja. Kao sirovina za proizvodnju bioplina koristi se biorazgradivi otpad iz poljoprivrednih kultura te organskih ostataka i otpada biljnog i životinjskog porijekla: svinjska gnojovka, goveđa gnojovka, kokošji gnoj, pljevice, kukuruzna silaža i sl.

Situacijski nacrt navedenog bioplinsko postrojenja prikazano je na slici 1., a sastoji se od kolne vage, prostora za prihvata i skladištenje sirovine, prijemnih jama, fermentora za dobivanje bioplina (2 kom.), spremnika digestata, objekta za smještaj upravljačke opreme, pumpnog postrojenja, sušare i administrativne zgrade.



Slika 1. Situacijski nacrt kogeneracijskog bioplinskog postrojenja „Hrastin“ [5]

U nastavku rada bit će prikazani karakteristični dijelovi bioplinskog postrojenja koji su najviše izloženi djelovanju korozije, kao i mogućnosti njihove zaštite.

### 3. Rezultati i rasprava

Jedan od glavnih uzroka korozije u bioplinskim postrojenjima je prisutnost sumporovodika ( $H_2S$ ). Kada se sumporovodik spoji sa vodenom parom koja je sadržana u bioplínu nastaje sumporna kiselina. Navedena kiselina nagriza motore koji se koriste u bioplinskom postrojenju, kao i ostale komponente sustava (cjevovode, cijevne priključke, fermentore, mješače, itd.) Kako bi se smanjio udio sumporovodika u bioplinskom postrojenju, nužno je provesti postupak odsumporavanja i sušenja bioplina. U nastavku rada navedeni su dijelovi bioplinskog postrojenja koji su izloženi korozijskom djelovanju te mjere zaštite od korozije.

#### 3.1. Korozija cjevovoda i cijevnih priključaka

Kako je ranije navedeno, bioplín u svom kemijskom sastavu sadrži sumporovodik ( $H_2S$ ) i merkaptane (spojeve ugljika, vodika i sumpora) koji mogu kondenzirati u obliku slabe sumporne kiseline (ovisno o sadržaju  $H_2S$  u bioplínu), koja unutar cjevovoda može





uzrokovati agresivnu koroziju u slučaju da je cjevovod izrađen od neodgovarajućeg materijala. Armature i cjevovodi koji se koriste u sustavima za proizvodnju bioplina moraju biti otporni na koroziju i prikladni za doticaj s materijalima koji se pojavljuju u toj proizvodnji (bioplin i biomasa). Odabir materijala za izradu cjevovoda ovisi o vrsti materijala koji će se transportirati i tlaku u cjevovodu, a uključuje materijale poput poli(vinil-klorida) (PVC), polietilena visoke gustoće (PEHD), čelika ili nehrđajućeg čelika. Radi sigurnosti rada unutar bioplinskog postrojenja, moraju biti zajamčeni minimalni uvjeti za cjevovode i armature u pogledu kvalitete materijala, sigurnosnih pitanja i nepropusnosti [3]. Cjevovodi izrađeni od PVC-a otporni su na koroziju, ali se njihova uporaba ne preporučuje jer navedeni materijal nema potrebnu vlačnu čvrstoću, a može biti i statički nabijen. Međutim, cijevi izrađene od PEHD-a, koje su pogodne za opskrbu prirodnim plinom, mogu se koristiti i za ukopane cjevovode za transport bioplina jer se ukopavanjem smanjuje utjecaj ranije navedenih problema (smanjena vlačna čvrstoća i statički elektricitet). Na slici 2. prikazan je PEHD cjevovod za transport bioplina do baklje za spaljivanje na bioplinskom postrojenju „Hrastin“.



**Slika 2.** PEHD cjevovod na bioplinsko postrojenju „Hrastin“ [5]

Nadzemni cjevovodi za transport bioplina uglavnom se izrađuju od metala, najčešće nehrđajućeg čelika. Također, za cjevovode se mogu koristiti i neki drugi materijali koji nisu tako otporni na koroziju, ali se u tom slučaju mora obaviti odsumporavanje (uklanjanje H<sub>2</sub>S) bioplina. Na slici 3 prikazana je ravnomjerna korozija na cijevnom priključku (izlaznoj cijevi) za odvoz digestata.



**Slika 3.** Cijevni priključak na izlaznoj cijevi za odvoz digestata [5]

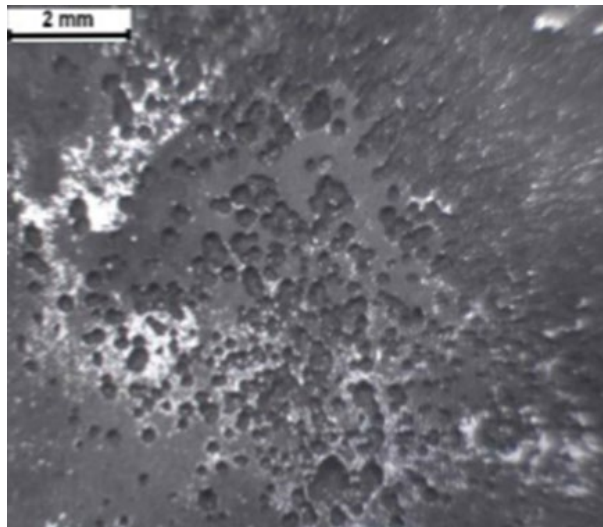
Cjevovodi za transport bioplina trebali bi biti toplinski izolirani jer se kod ne izoliranih cijevi pojavljuje kondenzacija i stvaranje vlage što nakon spajanja sa sumporovodikom dovodi do stvaranja sumporne kiseline koja uzrokuje koroziju na dijelovima bioplinskog postrojenja, npr. motora ili pumpi. Rješenje ovog problema je povećanje izolacije cijevi, uklanjanje H<sub>2</sub>S karbonskim filterima ili grijanje cijevi radi izbjegavanja kondenzacije [6].

Prilikom projektiranja cjevovoda za bioplin trebalo bi uključiti dodatni sigurnosni faktor koji je vezan za rupičastu (pitting) koroziju do koje može doći unutar cjevovoda. Korozija može promijeniti unutarnji promjer cjevovoda što može uzrokovati probleme s protokom [7].

### 3.2. Korozija fermentora (digestora)

U bioplinskom postrojenju središnji dio predstavlja fermentor ili digestor, a on se može nalaziti na površini ili u zemlji. Fermentor je nepropusni spremnik unutar koje se odvija proces anaerobne digestije, toplinski je izoliran, a najčešće se izrađuje od betona, čelika ili plastike.

Autori [8] navode kako gnojovka, kofermenti i nastajući bioplin mogu zbog svojih fizikalno-kemijskih svojstava nagrizzati materijale kao što su beton i čelik, zbog čega je nužno zaštititi stjenke fermentora. U pravilu, dijelovi koji su u stalnom kontaktu s gnojovkom (čelični ili betonski) ne korodiraju pa najčešće na tim dijelovima nije potrebno stavljati zaštitu (u vidu plastičnih ili staklenih obloga), kao niti emajlirati ili primijeniti visokokvalitetni čelik. Obavezno se moraju zaštititi oni dijelovi i područja fermentora koji nisu stalno pokriveni tekućim medijem (gnojovkom). Na slici 4 prikazana je rupičasta korozija stjenke čeličnog fermentora.



**Slika 4.** Rupičasta korozija stjenke fermentora [9]

Kao mjere zaštite čeličnih površina fermentora od korozije primjenjuju se epoksidni premazi, staklene ili plastične obloge te izrada spremnika od nehrđajućeg čelika. Navedene mjere sprječavaju izravan kontakt između agresivnog medija i unutarnje stjenke fermentora te na taj način smanjuju mogućnost pojave korozije kao i trošenje čeličnih dijelova. Na slici 5 prikazan je proces postavljanja plastičnih obloga na stjenke fermentora.



**Slika 5.** Plastične obloge fermentora [10]

Autori [11] navode kako staklene obloge fermentora pružaju vrhunsku zaštitu čeličnih stjenki od korozije s obzirom na kiseline, lužine, vodu i druge kemijske otopine, ali im je cijena visoka te su vrlo podložne oštećenjima od udara, a popravci su vrlo skupi.

Kao najbolja mjera zaštite fermentora od djelovanja korozije je primjena nehrđajućeg čelika za izradu njegovih dijelova. Prednosti se očituju kroz vrlo visoku otpornost na koroziju, dobra mehanička svojstva (čvrstoća, tvrdoća i žilavost) te malim zahtjevima za održavanjem i popravkom. Uz primjenu nehrđajućeg čelika nema potrebe za dodatnim premazivanjem metalnih površina te nije potrebno uključivati dodatak za koroziju prilikom proračuna debljine stjenke fermentora što donosi određene ekonomske uštede. U smislu održavanja primjenom nehrđajućeg čelika smanjuje se potreba za održavanjem unutar fermentora što minimalizira kašnjenja u proizvodnji bioplina koja su uzrokovana prekidom procesa anaerobe digestije.

Također, nehrđajući čelik ima glatku površinu koja se lako čisti uz minimalna rizik otpuštanja bilo kojeg elementa u digestat. Na slici 6 prikazan je fermentori miješalica digestata izrađeni od nehrđajućeg čelika.



**Slika 6.** Fermentor od nehrđajućeg čelika [6]

Osim za izradu dijelova fermentora, nehrđajući čelik idealan je materijal za izradu i niza drugih komponenti u bioplinskom postrojenju, kao npr. razni spremnici, pumpe, ventili, miješalice, itd.

### 3.3 Korozija pokretnih dijelova bioplinskog postrojenja

Unutar bioplinskog postrojenja javljaju se različiti oblici trošenja koji su uzrokovani abrazijom uslijed stalnog kretanja tvrdih sastojaka digestata (npr. pijeska) u cjevovodima i fermentorima. Ovom trošenju najviše su izloženi dijelovi poput crpki, miješalica, pužnih transportera i sl., koji su zbog svoje funkcije u stalnom kontaktu s pokretnim digestatom. Zbog masenog opterećenja, potisne sile i sile zatezanja digestat troši vrhove lopatica propelerskih miješalica i crpki što dovodi do kavitacije i kavitacijske erozije, a posljedično i do propadanja metalnih materijala. Na slici 7 je prikazana kavitacijska erozija rotora crpke.



**Slika 7.** Kavitacijska erozija rotora crpke [5]

Autori [9] navode kako velika trošenja crpki nastaju kada nisu dovoljno dobro dimenzionirane za potreban otpor i tlak. Isto vrijedi i za miješalice u slučaju da moraju miješati velike količine



digestata ili ako je viskoznost digestata prevelika. Opterećenje dovodi do kavitacije i kavitacijske erozije što može dovesti do oštećenja ležaja i loma lopatica. Na slici 8 prikazana je korozija lopatica mješača digestata.



**Slika 8.** Korozija lopatica mješača digestata [5]

Kao učinkovita zaštita od korozije lopatica mješača digestata je izrada lopatica od nehrđajućeg čelika ili polimernih materijala. Za izradu lopatica mješača dozvoljena je primjena polimernih materijala koji su otporni na iskrenje budući je radno okruženje mješača potencijalno eksplozivno.

#### 4. Zaključak

Bioplin kao glavni proizvod bioplinskih postrojenja ima nekoliko važnih uloga, npr. kao energent, kao pogonsko gorivo u transportnim sredstvima, ali prvenstveno kao obnovljivi izvor energije koji u značajnoj mjeri doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova. Tehnologija proizvodnje bioplina, koja se temelji na oksidaciji i fermentaciji biljnih ostataka uvelike pogoduje razvoju korozije koja u značajnoj mjeri može oštetiti metalne dijelove bioplinskog postrojenja. Tome doprinosi i prisutnost sumpora, odnosno sumporovodika u bioplina koji reagira s vodenom parom i tvori izuzetno korozivnu agresivnu sumpornu kiselinu.

Kako bi utjecaj korozije na dijelove bioplinskih postrojenja bio što manji postoji nekoliko učinkovitih rješenja ovisno o dijelovima bioplinskog postrojenja. Neke od metoda zaštite od korozije su primjena korozivski otpornih materijala (npr. polimeri, nehrđajući čelici, itd.), primjena epoksidnih premaza kao i primjena plastičnih i staklenih obloga u spremnicima (fermentorima). Ključna mjera zaštite od korozije dijelova bioplinskog postrojenja je provođenje postupka desumporizacije (uklanjanje sumpora) i sušenja bioplina, čime se smanjuje mogućnost stvaranja sumporne kiseline.

#### 5. Literatura

- [1] Korbag, Issa; Saleh Omer Salma, Mohamed; Boghazala, Hanan; Abusasiyah, Mousay Ahmeedah Aboubakr. Biogas – Recent Advances and Integrated Approaches. 2020.
- [2] Špicnagel Ana-Marija. Potencijal bioplinskih postrojenja u hrvatskom poljoprivrednom sektoru. Knjiga. Sisačko-moslavačka županija. Sisak. 2014.

- [3] Al Seadi, Teodorita; Rutz, Dominik; Prassl, Heinz; Köttner, Michael; Finsterwalder, Tobias; Volk, Silke; Janssen, Rainer; Kulušić Biljana; Kojaković, Ana. Priručnik za bioplin. Energetski institut Hrvoje Požar. Zagreb. 2009.
- [4] Alar, Vesna. Kemijska postojanost metala. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb. 2015.
- [5] Nadarević, Mato. Korozija metala u bioplinskom postrojenju. Završni rad. Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Osijek. 2019.
- [6] Stainless steel tanks for biogas production. The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot. 2016. [https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/power\\_generation/Stainless\\_steel\\_tanks\\_for\\_biogas\\_production.pdf](https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/power_generation/Stainless_steel_tanks_for_biogas_production.pdf)
- [7] Biogas Piping Design and Safety Fundamentals. Bio Cycle – The Organics Recycling Authority. <https://www.biocycle.net/biogas-piping-design-and-safety-fundamentals/>. (25.5.2024.)
- [8] Krička, Tajana; Voća, Neven; Jurišić, Vanja. Pojmovnik bioplina: priručnik. Gradski ured za poljoprivredu i šumarstvo. Grad Zagreb. 2009.
- [9] Andrade, Diana; Bischoff, Manfred; Feser, Ralf; Krebs, Alexander, Küver, Jan; Lichti, Fabian; Remesch, Markko. Korrosion metallischer Werkstoffe in Biogasanlagen. Optimierte Werkstoffauswahl für die anaerobe Vergärung nachwachsender Rohstoffe auf Basis der Kenntnis und Evaluation der Korrosionsprozesse. [https://biogas.fnr.de/fileadmin/user\\_upload/leitfaden\\_korrosion\\_metallischer\\_werkstoffe\\_in\\_biogasanlagen\\_1\\_.pdf](https://biogas.fnr.de/fileadmin/user_upload/leitfaden_korrosion_metallischer_werkstoffe_in_biogasanlagen_1_.pdf) (1.6.2024.)
- [10] Plastične obloge za stjenke fermentora. <https://www.roechling.com/industrial/oeping>. (2.6.2024.)
- [11] Silva, Marina; Belli, Tom. Biomass magazine. Corrosion Management of Anaerobic Digesters and Sludge Tanks. <http://biomassmagazine.com/articles/15839/corrosion-management-of-anaerobic-digesters-and-sludge-tanks> (2.6.2024.)



## Izazovi ugradnje split klima uređaja *Challenges of installing a split air conditioner*

M. Đogaš<sup>1</sup>, H. Glavaš<sup>1,\*</sup>, M. Primorac<sup>1</sup>, M. Žnidarec<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Osijek, Croatia

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [hrvoje.glavas@ferit.hr](mailto:hrvoje.glavas@ferit.hr)

### Sažetak

Promjene u energetskej politici dovodi do pojačanog interesa za split sustave klimatizacije koji mogu biti alternativa za grijanje stambenih prostora. Zadatak rada je prikazati izazove koje prati postupak ugradnje mono split klima sustava sa naglaskom na probleme koji se mogu pojaviti u slučaju nedovoljnog pridržavanja uputa za ugradnju. Rad pruža sveobuhvatan pregled važeće regulative, prezentira pojedine dijelove sustava te prikazuje najvažnije korake u postupku ugradnje o kojima ovisi dugovječnost sustava. Koristeći praktičan primjer nesvakidašnje ugradnje sa dva proboja prikazani su pojedini koraci. Ilustrirajući sve faze postupka fotodokumentacijom poseban naglasak stavljen je na spojeve cijevi i vakumiranje.

**Ključne riječi:** split klima uređaj, legislativa, ugradnja, grijanje

### Abstract

Changes in energy policy are leading to increased interest in split air conditioning systems, which can be an alternative for heating living spaces. The purpose of the article is to highlight the challenges associated with installing a mono split air conditioning system, focusing on the problems that can occur if the installation instructions are not followed properly. The article provides a comprehensive overview of current legislation, introduces individual parts of the system and shows the key steps in the installation process on which the longevity of the system depends. The individual steps are illustrated using a practical example of an unusual installation with a passage through two walls. In the illustration of all work steps with photo documentation, particular emphasis was placed on the flare connections and the vacuuming.

**Key words:** split air conditioner, legislation, installation, heating.

### 1. Uvod

Prirodni plin kao idealni energent za grijanje objekata na području RH ulazi polako u upotrebu od 1970. godine, [1]. Energetska politika EU kao jedan od ciljeva postavila je diversifikaciju europskih izvora energije i smanjiti ovisnost o uvozu energije. Split klima



uređaji kao dizalice topline zrak-zrak pomažu u ispunjenju navedenih smjernica. Skoro svi novi stambeni objekti s ciljem postizanja većeg energetskog razreda imaju ugrađene split sustave. Brojni vlasnici postojećih stambenih objekata uslijed dotrajalih plinskih instalacija odlučuju se na split sustave kao primarne izvore grijanja [2] čak i u kontinentalnoj Hrvatskoj što je zbog relativno niskih zimskih temperatura i vlage donedavno nije bilo zamislivo. Na području Osijeka od 2022. godine raste interes za grijanjem pomoću split klima uređaja, [3,4,5].

Praktična implementacija sustava dizalice topline zrak-zrak iziskuje ovlaštenog instalatera i ispunjenje uvjeta propisanih legislativnim aktima od kojih je za potrebe instalacije najvažnija lokalna 'Odluka o komunalnom redu' koja se donosi na osnovu Zakona o komunalnom gospodarstvu. U počecima klimatizacije na području Grada Osijek 2003. godine vrijedilo je pravilo da se klima uređaji, koji se postavljaju na vanjske dijelove zgrada, moraju postaviti na odgovarajućoj visini koja omogućava normalno kretanje pješaka i vozila a kapanje vode mora se izvesti na način da isto ne ometa normalno korištenje javnih površina ispod njih, [6]. Tijekom 2010. godine pokušalo se bolje definirati parametre ugradnje i uvedena je minimalna visina postavljanja vanjske jedinice od najmanje 3,5 metara od kote terena, [7]. Klimatske promjene koje dovode do potrebe za hlađenjem i realni uvjeti u gradovima doveli su do daljnjih izmjena 'Odluka o komunalnom redu' iz kojih je izostavljanja minimalna visina [8].

## 2. Pregled legislative vezane uz ugradnju split sustava

Ugradnja split klima uređaja mora se provesti sukladno lokalnoj odluci o komunalnom redu, ali uvažavajući zakone i pravilnike koji reguliraju klimatizaciju te tehničke norme koje olakšavaju izazove instalacije sustava. Tri su osnovna zakona u RH: Zakon o energetske učinkovitosti, Zakon o gradnji i Zakon o klimatskim promjenama i zaštiti ozonskog sloja. Indirektno split klima uređaje, trenutno, dotiču još dva zakona: Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji kroz odredbe koja se odnosi na izračun udjela iz obnovljivih izvora energije jer se split klima koristi za preuzimanje energije iz okoliša te Zakon o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara koji je doveo do konzervatorskih smjernica, [9]. Višestambene zgrade bit će uskoro obuhvaćene još jednim zakonom koji je u pripremi, Zakonom o upravljanju i održavanju zgrada koji predviđa osnivanje zajednica suvlasnika koja bi bila pravna osoba sa osobnim identifikacijskim brojem (OIB). U skoroj budućnosti može se očekivati uvođenje digitalnog dnevnika zgrade tzv. Building Renovation Passport-a (BRP) koji proizlazi iz Energy Performance of Buildings Directive. BRP će definirati dugoročni (15-20 godina) plan obnove zgrada, [10].

### 2.1. Zakon o energetske učinkovitosti, NN 127/2014

Zakon o energetske učinkovitosti definira energetske obnove zgrade i primjene mjera energetske učinkovitosti u svrhu poboljšanja energetskog svojstva zgrade ili njezina dijela i temeljnog zahtjeva za građevinu. Zakon daje smjernice o gospodarenju energijom i očuvanje topline, pri čemu mjere energetske učinkovitosti obuhvaćaju unapređenje



tehničkih sustava zgrade koji uključuju tehničku opremu za grijanje, hlađenje, ventilaciju, klimatizaciju i pripremu potrošne tople vode.

## 2.2. Zakon o gradnji, NN 125/19.

Zakon o gradnji propisuje redoviti pregled sustava grijanja i sustava hlađenja ili klimatizacije u zgradi te opremanje sustavima automatizacije. Vlasnik zgrade, odnosno njezina posebnog dijela, sa sustavom grijanja dužan je osigurati redoviti pregled dostupnih dijelova sustava grijanja ili kombiniranog sustava grijanja i ventilacije prostora efektivne nazivne snage veće od 70 kW najmanje jednom u deset godina, a što se može obaviti i zajedno s energetske pregledom zgrade. Vlasnik nestambene zgrade čija je efektivna nazivna snaga sustava grijanja ili kombiniranog sustava grijanja i ventilacije prostora, sustava hlađenja ili klimatizacije, odnosno kombiniranih sustava klimatizacije i ventilacije veća od 290 kW, mora osigurati opremanje zgrade sustavima automatizacije i upravljanja zgradom.

## 2.3. Zakon o klimatskim promjenama i zaštiti ozonskog sloja, NN 127/19

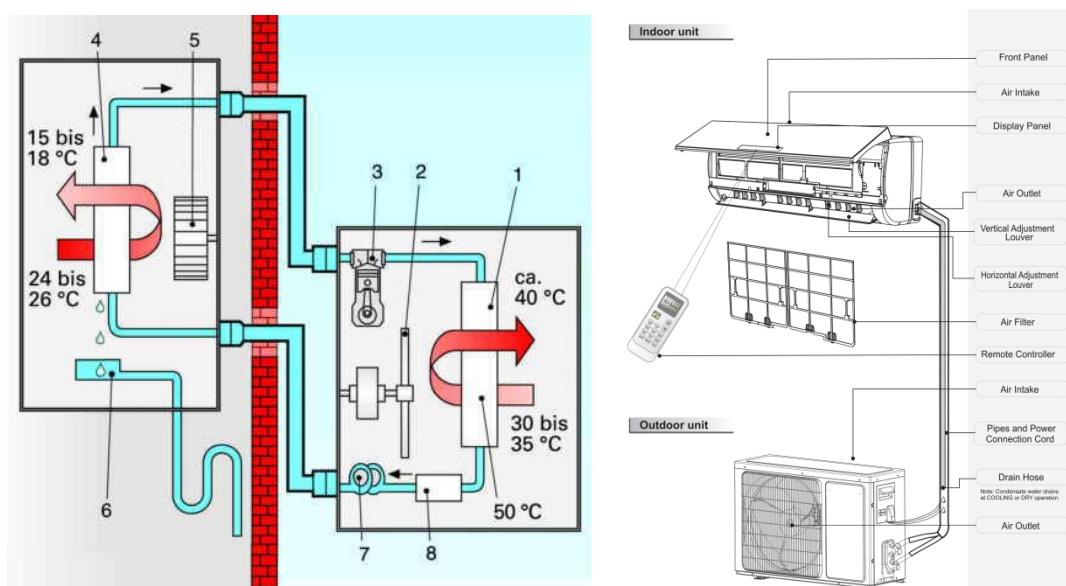
Zakon o klimatskim promjenama i zaštiti ozonskog sloja propisuje da instalaciju i servisiranje klima uređaja smije provesti samo ovlaštena osoba koja je registrirana za djelatnost prikupljanja, provjere propuštanja, ugradnje i održavanja ili servisiranja rashladnih i klimatizacijskih uređaja i opreme, dizalica topline, nepokretnih protupožarnih sustava i aparata za gašenje požara koji sadržavaju kontrolirane tvari definirane Uredbom (EU) 1005/2009 ili fluorirane stakleničke plinove definirane Uredbom (EU) 517/2014 ili o njima ovise. Tijelo državne uprave nadležno za zaštitu okoliša rješenjem izdaje dozvole za obavljanje djelatnosti iz područja klimatizacije, <https://reg.azo.hr/>. Pravna osoba ili obrtnik može ishoditi dozvolu tijela državne uprave nadležnog za zaštitu okoliša za obavljanje djelatnosti ugradnje klimatizacijskih uređaja i oprema te dizalice topline, isključujući i opremu u motornim vozilima. Novčanom kaznom u iznosu od 100.000,00 do 300.000,00 kuna kaznit će se za prekršaj pravna osoba ako: obavlja djelatnost prikupljanja, provjere propuštanja, ugradnje i servisiranja rashladnih i klimatizacijskih uređaja, dizalica topline, protupožarnih sustava i aparata za gašenje požara koji sadrže kontrolirane tvari ili fluorirane stakleničke plinove ili o njima ovise, a da nije ishodila dozvolu tijela državne uprave nadležnog za zaštitu okoliša. Kazna za ugradnju klima uređaja po principu uradi sam nije definirana, ali službene osobe savjetuju prijavu navedene aktivnosti tijelima državne uprave.

## 3. Smjernice za ugradnju split sustava

Rad je prvenstveno posvećen mono split klima uređajima koji statistički predstavljaju najveći broj klima ugrađenih u stambene objekte. Svaki proizvođač s uređajem isporučuje detaljne upute za ugradnju koje su u suštini dosta slične i opće poznate. Cilj rada je usmjeriti pažnju na elemente ugradnje koji dugoročno mogu stvoriti probleme u održavanju i radu, a često su zanemareni od strane izvođača radova. Blok prikaz i pojedini elementi

mono split sustava prikazani su slikom 1. na kojoj su vidljive i tipične vrijednosti temperature u režimu hlađenja. Elementi sustava označeni brojevima odnose se na:

1. kondenzator
2. ventilator kondenzatora
3. kompresor
4. isparivač
5. ventilator isparivača
6. Posuda za kondenzat
7. Kapilarni injekcijski ili ekspanzijski ventil
8. Filter-sušlač



**Slika 1.** Split klima sustav, tipične vrijednosti temperatura i dijelovi, [11, 12]

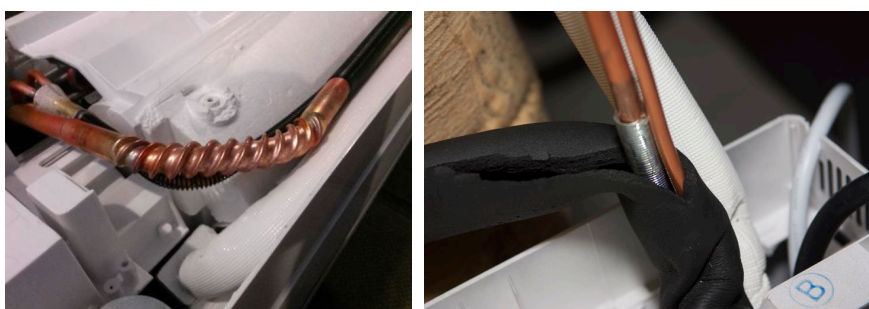
Najznačajniji izazovi ugradnje split klima uređaja (uz pretpostavku da se instalacija provela sukladno uputama proizvođača) su neispravan rad zbog mehaničkog smanjenja presjeka vodova radne tvari, gubitak radne tvari uslijed loših spojeva i skraćeni životni vijek kontaminacijom, posebice prilikom ugradnje na vodove stare instalacije. Životni vijek klima uređaja prema HRN EN 15459-1:2017 procijenjen je na 15 godina s godišnjim troškovima održavanja u iznosu 4% investicije, [13, 14].

Mehaničko smanjenje presjeka vodova najčešće se događa kada instalateri u brzini mijenjaju položaj seta cijevi unutar jedinice te prilikom promjene smjera cijevi neposredno nakon izlaza iz vanjskog zida. Radijus savijanja ovisi o promjeru cijevi, ali u praksi je uobičajen minimalni radijus od 10 cm, koji kod nekih proizvođača ide sve do vrijednosti od 30~40 mm [15]. Slika 2. prikazuje tipično nagnječenje izolirane cijevi koje se otkriva nakon otvaranja izolacije, a posljedica je pogreške instalatera i nekorištenja alata za savijanje



**Slika 2.** Nagnječenje bakrene cijevi, [16]

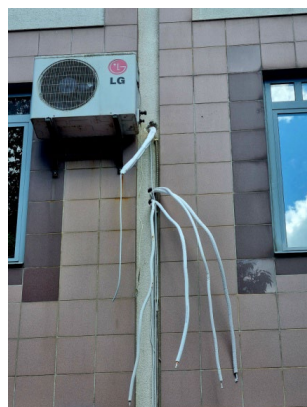
Proizvođači svjesni navedenog problema cijevi unutarnje jedinice opremaju oprugom za savijanje ili prilagođenom konstrukcijom što je prikazano na slici 3.



**Slika 3.** Prvo mjesto promjene smjera sa mjerama za smanjenje prignječenja

Instalacija split sustava na objektima u izgradnje predstavlja dodatni izazov u kojem građevinski radnici mogu nagnječiti cijevi jer je ugradnja najčešće izvedena u dvije faze, postavljanje bakrenih cijevi i po završetku građevinskih radova ugradnja vanjske i unutrašnje jedinice. Nagnječenje koja se pri tome mogu pojaviti predstavljaju ozbiljan problem jer cijevi mogu biti ugrađene u estrihe (podove) ili ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems) fasade.

Ugrađene cijevi koje duže vrijeme čekaju završetak građevinskih radova mogu oksidirati uslijed kondenzacije što dodatno uvodi kontaminaciju u sustav i smanjuje životni vijek. Slika 4. prikazuje instalacije na vanjskoj fasadi čiji su krajevi zatvoreni bijelom izolacionom trakom. Ukoliko se očekuje duži period radova cijevi je na krajevima potrebno zatvoriti lemljenjem.



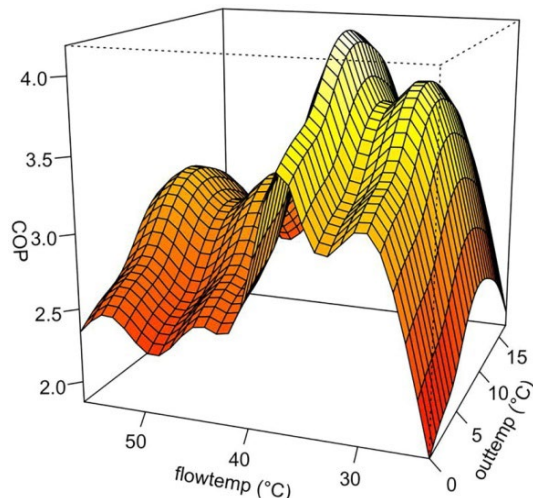
**Slika 4.** Postavljene cijevi za buduću ugradnju zatvorene izolacijskom trakom

Cijevi dostupne na tržištu su uglavnom dobre kvalitete, ali ponekad mogu bit porozne (posebno u slučaju produžavanja) te tijekom godina eksploatacije polako ispuštati radnu tvar. Kako bi se osigurao dugotrajni period eksploatacije preporuka je provesti tlačnu probu dušikom. Tlak tlačne probe je 1,43 puta maksimalni radni tlak koji se može pojaviti u sustavu. Proizvođači u uputama za instalaciju navode tlakove od 2 bar do 34,47 bara, [15]. Slika 5. prikazuje iznose tlaka tijekom tlačne probe za pojedine radne tvari.

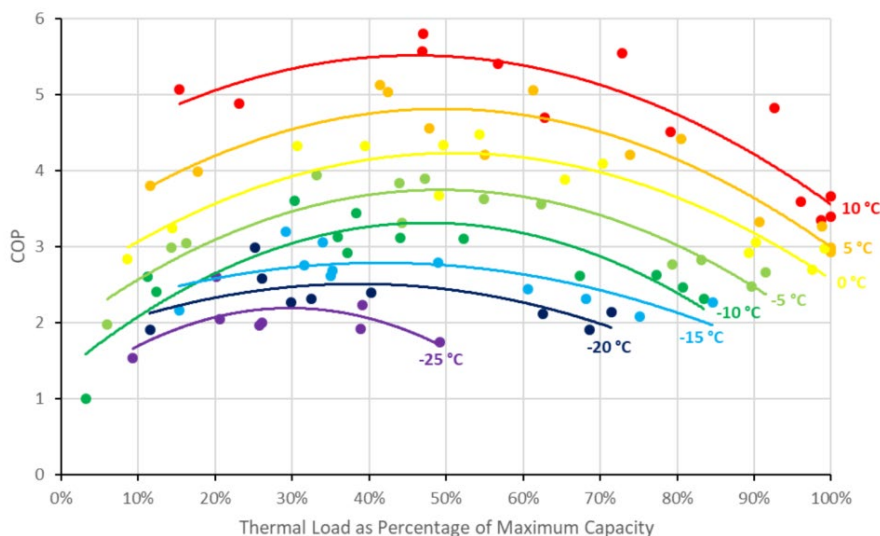


**Slika 5.** Manometar seta za tlačnu probu.

Tlačnu probu u praksi ne bi trebalo izvoditi sa tlakom većim od 21 - 25 bara jer može doći do oštećenja navoja ekspanzijskog ventila. Tlak u sustavu dostiže vrijednosti do 18 bara tijekom grijanja i do 6 bara u postupku hlađenja. Tijekom ciklusa grijanja za jedan kWh električne energije dobijemo u prosjeku do 5 kWh toplinske energije, [17]. Prilikom tehnokonomске analize mora se voditi računa da je COP (Coefficient of Performance) nije konstanta te za dizalice topline predstavlja vrijednost ovisnu o vanjskoj temperaturi i zadanoj temperaturi grijanja, slika 6. Slika 7. preglednije prikazuje COP kao funkciju vanjske temperature i opterećenja sustava.

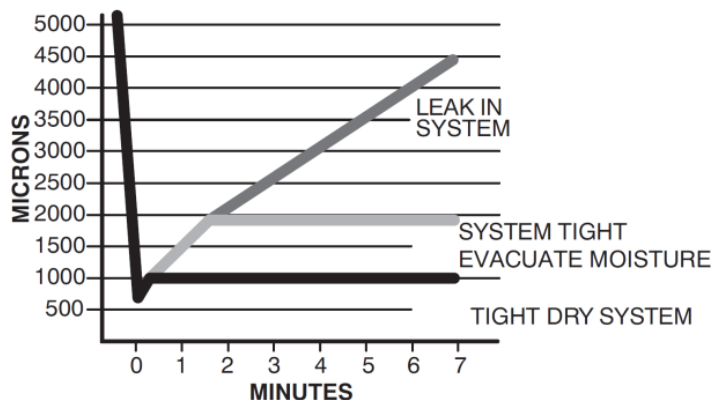


**Slika 6.** Ovisnost COP-a dizalice topline za pojedine iznose vanjske temperature i odabrane vrijednosti polaznog voda, [18].



**Slika 7.** COP kao funkcija toplinskog opterećenja, [19].

Većina instalatera provodi samo vakumiranje sustava, a neki prilikom kratke udaljenosti vanjske i unutarnje jedinice koriste radnu tvar kako bi izbacili zrak iz cijevi bez provjere propuštanja. Vakumiranje je neophodno jer se na taj način iz sustava uklanjaju nekondenzirajući plinovi, zraka i dušik, kao i vlaga zaostala nakon gradnje sustava koja može dovesti do stvaranja kiseline kod starih sustava ili smanjenja podmazivanja kompresora. Na slici 8 prikazane su vrijednosti vakuuma u ovisnosti o trajanju vakuum probe.



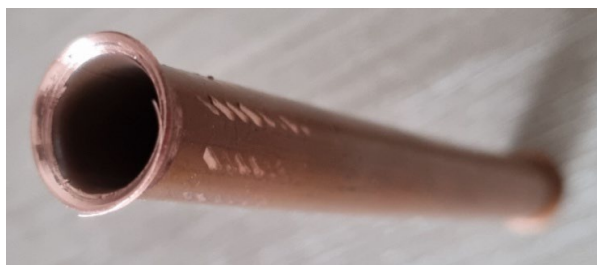
**Slika 8.** Vrijednosti vakuuma prilikom provjere sustava, [20].

Spojevi cijevi rashladnog sredstva predstavljaju najčešće mjesto propuštanja radne tvari. Razlog tome može biti loša kvaliteta materijala, loša završna obrada zamjenskih matica, nepravilno pertlanje i neodgovarajući moment prilikom pritezanja matice. Pertlanje je radnja koja predstavlja najvažniju fazu ugradnje. Površina dosjeda mora biti glatka bez risova, a postupak spajanja mora se provesti uz preporučeni moment stezanja u jednoj ili dvije faze pritezanja pri čemu se spoj nakon inicijalnog pritezanja manjim momentom otpušta i priteže na propisano vrijednost momenta. Tablica 1 prikazuje preporučene momente pritezanja, [19, 20].

**Tablica 1.** Preporučeni moment pritezanja i dimenzije dosjeda cijevi nakon pertlanja

Promjer cijevi	Moment stezanja Nm	Dimenzije pertlanja (mm)	
Ø 1/4" (6,35)	10,8 - 13,6	8,4 ~ 8,7	
Ø 3/8" (9,52)	20,3 - 24,4	13,2 ~ 13,5	
Ø 1/2" (12,7)	38,0 - 43,4	16,2 ~ 16,5	
Ø 5/8" (15,88)	51,5 - 56,9	19,2 ~ 19,7	
Ø 3/4" (19,05)	68,0 - 74,6	23,2 ~ 23,7	

Na slici 9 je prikazano neispravno proširivanje cijevi za spoj pertlanjem izveden neprikladnim alatom bez upotrebe ulja sa jasno vidljivim srhom.



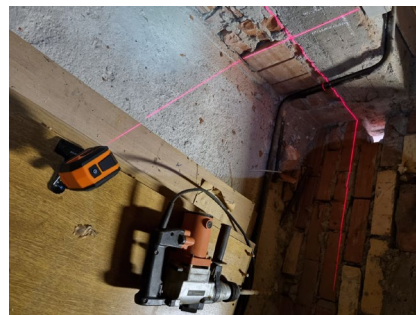
**Slika 9.** Primjer neispravno proširivanje cijevi za spoj pertlanjem izveden neprikladnim alatom bez upotrebe ulja

#### 4. Postupak ugradnje mono split klima uređaja u realnim uvjetima

Kao primjer postupka ugradnje mono split klima uređaja prikazana je instalacija sa dva proboja pri čemu cijevi radnog medija prelaze preko tavanog prostora, a unutarnja jedinica je smještena na kraju stepeništa i betonskoj gredi nasuprot prozora koji se nalazi neposredno ispod stropa, slika 10. Ograničenja arhitektonskog rješenja mogu se zaobići bez problema uvažavajući maksimalnu udaljenosti vanjske i unutarnje jedinice do 4m bez dodavanja radne tvari i održavanja pada za odvod kondenzata. Zbog ograničenja koje predstavlja crijevo kondenzata neophodno je nivelirati sustav i osigurati dostatni pad. Crijevo kondenzata spaja se na kanalizaciju objekta koja se nalazi s lijeve strane unutarnje jedinice zbog čega je prvi proboj zida od cigle napravljen s lijeve strane stepeništa.



**Slika 10.** Smještaj unutarnje jedinica na betonskom nadvoju.



**Slika 11.** Niveliranje instalacije radi nesmetane odvodnje kondenzata

Drugi proboj napravljen je kroz tavanski zid od bloka ispod kojeg su prethodno postavljeni nosači vanjske jedinice uvažavajući potrebu za pristupom spojnim mjestima radi periodičnog održavanja, slika 11. Na unutrašnju jedinicu spaja je crijevo odvoda kondenzata, a spojno mjesto osigurava vodotijesnom trakom preko koje je stavljen sloj izolacione trake kako bi se spriječilo hvatanje nečistoća na spoju, slika 12.



**Slika 12.** Nosači vanjske jedinice nasuprot unutarnje.

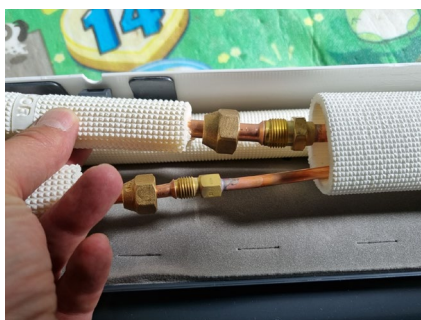


**Slika 13.** Spajanje crijeva za odvod kondenzata

Po završetku grubih građevinskih radova pristupa se spajanju cijevi radne tvari nakon čega slijedi spoj komunikacijskih vodiča i pojne mreže. Na slici 14 prikazana je obrada kraja cijevi, pertlanje i izgled dobrog dosjeda. Spajanje cijevi na unutrašnju jedinicu prikazano slikom 15. potrebno je provesti pritezanjem momentom definiranim tablicom 1. Unutrašnja jedinica se zatim može montirati na nosač vodeći računa o padu crijeva za odvod kondenzata što se trebalo provjeriti sipanjem vode u kadicu postavljene unutrašnje jedinice, slika 16.



**Slika 14.** Obrada kraja cijevi, pertlanje i izgled ispravnog spojnog mjesta



**Slika 15.** Spajanje cijevi na spojna mjesta.



**Slika 16.** Montaža unutrašnje jedinice

Pertlanje spojeva vanjske jedinice obavlja se neposredno nakon montaže vanjske jedinice kako bi se cijevi mogle skratiti na odgovarajuću dužinu, slika 17. U ovom slučaju zbog mogućnosti regulacije dužine cijevi koja će biti izvan vanjskog zida, relativno široke rupe i pomalo nezgodnog položaja za rad, pertlanje je izvršeno na prostoru tavana, slika 18.



**Slika 17.** Montaža vanjske jedinice.



**Slika 18.** Pertlani spojevi vanjske jedinice

Osjetljivi spojevi su zaštićeni prije prodora kroz zid papirom i trakom, slika 17. Nakon spajanja cijevi radne tvari pristupilo se spajanju komunikacijskog kabela i pojne mreže pazeći da su osigurači izvoda isključeni i osigurani od nehotičnog uključenja, slika 19. Vakumiranje se provodi vakuum pumpom koja nakon uključenja brzo spušta tlak, ali kako preporučeno vrijeme vakumiranja od 10 do 15 minuta prolazi tlak sve sporije pada. Iako neki proizvođači u svojim uputama [16] preporučuju dvostupanjske pumpe i znatno duže vrijeme vakumiranja. Provjeru stanja vakuuma u sustavu poželjno je pratiti što duže (do 2h) ali preporučeno minimalno vrijeme iznosi 10 minuta. Tijekom tog vremena potrebno je pratiti stanje vakuuma jer ako instrument pokazuje rast mikrona ne znači nužno da sustav propušta već da vlaga u sustavu nije u potpunosti isparila pa je postupak vakumiranja potrebno ponoviti dok se stanje vakuuma ne ustali i ne poprimi vrijednost ispod 500 mikrona. Što se tiče iznosa slika 7. sugerira kako je 500 microna dovoljno, ali veće vrijednosti vakuuma od 350 do 100 mikrona jamče dugotrajnost sustava. Prilikom vakumiranja i tlačenja sustava potrebno je voditi računa da je opružni ventil otvoren kako bi vrijednosti očitane na instrumentima odgovarale onima u sustavu. Po završetku spajanja vanjske jedinice pristupa se vakumiranju sustava, slike 20, 21 i 22.



**Slika 19.** Spojena vanjska jedinica.



**Slika 18.** Vakumiranje sustava





**Slika 21.** Tlak nakon uključenja pumpe.

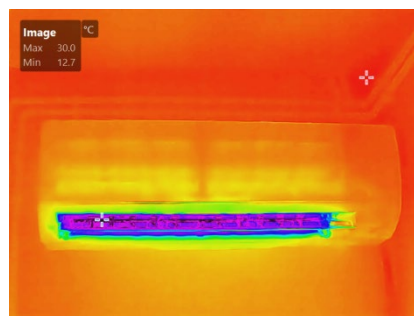


**Slika 22.** Tlak pred kraj vakumiranja

Voda uslijed smanjenog tlaka u sustavu isparava, a ujedno sustav je lišen kisika koji može dovesti do oksidacije i kontaminacije. Odspajanja vakuum pumpe sa sustava dovelo bi do ulaska zraka zbog čega se nakon gašenja pumpe i vremena promatranja od minimalno 10 minuta otvara ventil tekuće faze što dovodi do nestanka vakuuma. Zatim se ventil zatvara kako prilikom odspajanja pumpe ne bi došlo do prekomjernog gubitka rashladne tvari. Važno je napomenuti da se u vakuum pumpi može naći rashladne tvari zbog čega se mora paziti ukoliko se pumpa koristi za rad na sustavima sa različitim rashladnim tvarima, [21]. Po završetku odspajanja pumpe otvaraju se klipni ventili, i zatvaraju poklopcima koji svojom konstrukcijom brtve sustav urezujući se u mesingane dosjede. Postupak se provodi s momentom od 21,6-28 Nm kod poklopca klipa ventila i momentom od 10,8-14,7 Nm za servisni priključak, [16]. U konačnici klima uređaj se uključuje na električnu mrežu (slika 23.) i kontrolira se njegov rad mjereći vrijednosti temperature (slika 24.) u radu. Postupak ugradnje još nije gotov, neophodno je zaštititi vanjske dijelove izolacije cijevi od UV zračenja što se provodi oblaganjem aluminijskom trakom. U našem slučaju cijevi izložene u tavanskom prostoru potrebno je dodatno izolirati kako bi se smanjili gubitci, [22, 23].



**Slika 23.** Puštanje u pogon.



**Slika 24.** Mjerenje temperature

## 5. Zaključak

Split klime se sve češće koriste za grijanje u kontinentalnom dijelu RH kao dizalice topline. Ugradnja uređaja mora se provesti sukladno lokalnoj odluci o komunalnom redu uvažavajući zakone i pravilnike. Životni vijek klima uređaja procjenjuje se na 15 godina, što je moguće jedino ako se instalacija sustava provede sukladno uputama proizvođača i



pravilima struke. Kritični elementi instalacije su spojevi pertlanjem koji moraju izdržati tlakove do 30 bara. Najčešće instalateri provode samo vakumiranje sustava kao pokazatelj nepropusnosti. Vakumiranje je neophodno da bi se spriječila kontaminacija sustava vlagom i kisikom koji dovode do postepene degradacije sustava. Problemi loših spojeva rijetko se uoče u sezoni hlađenja kada tlakovi na spojnim mjestima poprimaju iznose do 6 bara, ali u sezoni grijanja kada tlakovi dosežu vrijednosti do 18 bara te može doći do postepenog gubitka radne tvari. Kako bi se gubitci sustava sveli na minimum potrebno je voditi računa i o toplinskoj izolaciji cijevi te po potrebi dodatno izolirati cijevi kroz koje prolazi radna tvar. Dobra priprema, detaljan pristup i precizna ugradnja osnova su za dugovječnost rada mono split klima sustava kao dizalice topline zrak–zrak.

## 6. Literatura

- [1] Ivanović, Milan; Tonković, Zlatko Bringing natural gas to the region of Slavonia – 40 years of HEP plin d.o.o., Nafta i Plin, ISSN 1330-2434, Volume 36., Number 148/2016.
- [2] Majetić, Dario, Opasnost od curenja i eksplozije, Dotrajale instalacije veći problem od cijene plina, Glas Slavonije, 29.07.2022.
- [3] Kuštro, Dario, Zašto isključivanje iz opskrbe plinom? HEP-Plin i Dimnjak: Sigurnost potrošača na prvom je mjestu, Glas Slavonije, 30.08.2022.
- [4] Šobak, Mateja, Kaos u Osijeku zbog izmjena plinskih brojila: Građani očajni, prijete im isključenjem, Večernji list, 22.06.2023.
- [5] Homa, Melita, Osječani nezadovoljni koncesionarom za dimnjačarske usluge, Regionalni dnevnik, HRT, 31.12.2023.
- [6] Grad Osijek, Odluka o izmjenama i dopunama odluke o komunalnom redu, Službeni glasnik Grada Osijeka br. 2/03, 07.04.2003.
- [7] Grad Osijek, Odluka o komunalnom redu" Službeni glasnik Grada Osijeka br. 14A, 17.12.2010.
- [8] Grad Osijek, Odluka o komunalnom redu" Službeni glasnik Grada Osijeka br. 10, 10.07.2023.
- [9] RH Ministarstvo kulture: "Opće konzervatorske smjernice za upravljanje javnim prostorom kulturno-povijesnih cjelina gradskih obilježja", Zagreb, 25. studenog 2019.
- [10] Fabbri, Mariangiola ; De Groote, Maarten; Rapf, Oliver, Building renovation passports, Customised roadmaps towards deep renovation and better homes, Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2016 (ISBN: 9789491143175)
- [11] Bosy web page, <http://www.bosy-online.de/Raumkuehlung.htm>, pristupljeno 30.04.2024.
- [12] Hisense, Installation instructions, CA35YR03G/CA35YR03W, Version No.1826846-02, 2022.
- [13] HRN EN 15459-1:2017 - Energijska svojstva zgrada -- Postupak ekonomske ocjene za energijske sustave u zgradama -- 1. dio: Postupak proračuna, Modul M1-14 (EN 15459-1:2017)
- [14] Đogaš, Martin, Izazovi ugradnje split klima uređaja, Diplomski rad, Sveučilište u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2024.

- [15] Daikin, Referentni vodič za instalatera, R32 Split sustav, RXA20A2V1B, RXA25A2V1B, RXA35A2V1B, 2018.
- [16] Reddi,  
[https://www.reddit.com/r/hvacadvice/comments/143q3ov/line\\_set\\_is\\_very\\_kinked\\_in\\_my\\_new\\_house\\_is\\_it/](https://www.reddit.com/r/hvacadvice/comments/143q3ov/line_set_is_very_kinked_in_my_new_house_is_it/) pristupljeno 30.04.2024.
- [17] Thorium A+, Split – klima uređaji!, <http://thoriumaplus.com/klima-uredaji-ostala-elektricna-trosila/>, pristupljeno 30.04.2024.
- [18] Michael Chesser, Pádraig Lyons, Pádraic O'Reilly, Paula Carroll, Air source heat pump in-situ performance, Energy and Buildings, Volume 251, 2021, 111365, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111365>.
- [19] Marsik, Tom, Vanessa Stevens, Robbin Garber-Slaght, Conor Dennehy, Robby Tartuilinguq Strunk, and Alan Mitchell. 2023. "Empirical Study of the Effect of Thermal Loading on the Heating Efficiency of Variable-Speed Air Source Heat Pumps" Sustainability 15, no. 3: 1880. <https://doi.org/10.3390/su15031880>
- [20] Carrier, DCNE 38MARB Outdoor Unit Single Zone Ductless System Instruction Manual, 2021-05-12
- [21] Kapıcıoğlu, Abdullah. "Theoretical Examination of Alternative Refrigerants for R410A in a Ground Source Heat Pump According to ASHRAE Classification". Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 9, no. 16, 2022, pp. 129-47, doi:10.54365/adyumbd.1028038.
- [22] Ali Ersöz, Mustafa; Yildiz, Abdullah, Determination of economic optimum insulation thickness of indoor pipelines for different insulation materials in split air conditioning systems, Bulletin of the JSME, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.11, No.1, 2016
- [23] Abdullah Yildiz, Mustafa Ali Ersöz, Determination of the economical optimum insulation thickness for VRF (variable refrigerant flow) systems, Energy, Volume 89, 2015, 835-844, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.020>.

# Potencijal snižavanja temperature ogrjevne vode u centraliziranim toplinskim sustavima treće generacije

## *Heating Water Temperature Lowering Potential in Third-Generation District Heating Systems*

D. Požgaj<sup>1,\*</sup>, B. Delač<sup>1</sup>, B. Pavković<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tehnički fakultet u Rijeci, Sveučilište u Rijeci, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [damir.pozgaj67@gmail.com](mailto:damir.pozgaj67@gmail.com)

### Sažetak

U radu je istražena mogućnost snižavanja temperature polaznog voda u centraliziranom toplinskom sustavu (CTS). Istraživanje je provedeno na primjeru studije slučaja CTS-a koji se koristi za grijanje zgrada i pripremu potrošne tople vode (PTV) u stambenoj četvrti u Rijeci. CTS je građen između 1969. i 1987. godine, koristi kotlove na prirodni plin i pripada trećoj generaciji CTS-a. U zgradama se koristi radijatorsko grijanje s temperaturom vode u polaznom vodu 90°C. Prikupljena je izvorna projektna dokumentacija zgrada i dokumentacija sustava grijanja s podacima o ugrađenim radijatorima. Simulacije toplinskih potreba provedene su u simulacijskom sučelju Trnsys. Utvrđeno je da su ugrađeni radijatori većeg kapaciteta od današnjih potreba jer su dimenzionirani prema starijoj normi za projektiranje sustava grijanja koja je obuhvaćala rezervu kapaciteta (DIN 4701 iz 1959.). Uz to, većina zgrada priključenih na sustav u međuvremenu je energetska obnovljena čime su toplinski zahtjevi za grijanjem smanjeni. Istraživanje pokazuje da se obzirom na trenutno stanje zgrada i postavljene radijatore temperatura polaznog voda može sniziti na nižu, u rasponu od 60°C do 76°C, ovisno o razmatranoj zgradi, a time sustav postaje pogodan za primjenu srednje temperaturnih dizalica topline. Analizom je utvrđeno da bi se temperatura polaznog voda u pojedinim zgradama mogla spustiti i do 41°C da vlasnici stanova nisu uklonili dio radijatora.

**Ključne riječi:** CTS, simulacija, obnova.

### Abstract

This paper investigates the possibility of lowering the temperature of the heating water in the supply line of the district heating (DH) system. The research was conducted on the case study of a DH system for a residential area in Rijeka, which is used for heating buildings and domestic hot water (DHW). DH system was built between 1969 and 1987, uses natural gas boilers, and belongs to the third generation of DH systems. High-temperature radiator heating is used in buildings with a supply temperature of 90°C. Original project documentation of buildings and heating systems was collected with data on installed

radiators in buildings. Simulations of thermal needs were carried out in the Trnsys simulation environment. It was found that the installed radiators had a larger capacity than today's needs because they were dimensioned according to an older standard (DIN 4701 from 1959.) for the design of heating systems, which included a capacity reserve. In addition, most of the buildings connected to the system have been energetically renovated, reducing thermal energy requirements. It was found, that in its present condition, the heating system allows for reducing the water temperature from 60°C to 76°C depending on the considered condition of the building envelope and the number of installed radiators, making the system suitable for the application of medium-temperature heat pumps. The analysis determined that the temperature of the supply pipe could have declined to 41°C in some buildings if the apartment owners had not removed a certain number of radiators.

**Key words:** DH, simulation, renovation.

## 1. Uvod

Proizvodnja i potrošnja energije za grijanje i hlađenje zgrada odgovorni su za više od 75% emisija stakleničkih plinova na prostoru EU. Oko 40% ukupne potrošnje energije u EU troši se u zgradama. Primjena centraliziranih toplinski sustava (CTS) za grijanje zgrada može postati najčišći oblik proizvodnje toplinske energije, a time i doprinijeti smanjenju ovisnosti o potrošnji i uvozu fosilnih goriva [1]. Definicija i podjela CTS-a prema korištenoj tehnologiji i vremenu nastanka je utvrđena preglednim člankom [2]. Transformacija postojećih CTS-a treće generacije koji su bazirani na fosilnim gorivima u noviju generaciju CTS-a je neophodna. Za prelazak iz treće u četvrtu generaciju CTS-a potrebno je smanjiti temperaturu vode u toplovodu, a to predstavlja jedan od najvećih izazova u transformaciji jer toplinske potrebe potrošača moraju ostati namirene. Smanjenjem temperature vode smanjuju se gubici topline u toplovodu, a sustav može postati pogodan za efikasnu primjenu dizalica topline. Dosadašnja istraživanja pokazala su da su koristi ostvarene prelaskom na četvrtu generaciju CTS-a veće od troškove ulaganja. Za uvođenje četvrte generacije CTS-a potrebno je smanjiti potrošnju energije i omogućiti rad sustava grijanja pri nižim temperaturama (prosječno 50/20°C), istovremeno zadržavajući udobnost kod krajnjeg korisnika. U zgradama koje su energetske obnovljene uz visok stupanj toplinske izolacije vanjske ovojnice postojeći radijatori i izmjenjivači topline mogu osigurati dovoljnu količinu topline kada rade pri nižim temperaturama polaza [3]. U većini slučajeva distributer toplinske energije ne raspolaže svim potrebnim podacima sustava grijanja u zgradama, pa je potreban njihov točan izračun [4]. Preporuke za prijelaz CTS-a iz treće na četvrtu generaciju uključuju ukidanje kratkog spoja između polaznog i povratnog voda distribucijske mreže, mjerenje pojedinačne potrošnje energije, praćenje svih parametara u cijevnoj mreži, povećanje toplinskog učinka izmjenjivača topline u toplinskim podstanicama, povećanje toplinskog učinka radijatora, hidrauličko uravnoteženje cjevovoda u zgradama i zaštitu od legionele u sustavima potrošne tople vode (PTV) [5]. Dinamička simulacija programskim alatima za modeliranje smatra se ključnom metodom za razvoj novih i obnovu postojećih CTS-a [6]. U radu je provedena analiza mogućnosti snižavanja temperature ogrjevnice vode u toplovodu u cilju prelaska CTS-a iz treće u četvrtu generaciju. Analiza je provedena na studiji slučaja

CTS-a naselja Kozala u gradu Rijeci. Provedeno je dinamičko modeliranje potrošnje toplinske energije za grijanje zgrada i pripremu PTV u zgradama pomoću programa Trnsys. Provedena je simulacija za postojeće stanje ovojnica zgrada i za slučaj energetske obnove svih zgrada spojenih na CTS. Proveden je izračun temperaturnih režima vode za grijanje kod vanjskih temperatura  $-8^{\circ}\text{C}$ ,  $2^{\circ}\text{C}$  i  $12^{\circ}\text{C}$  za postojeće stanje radijatora u zgradama, kao i za slučaj da su svi radijatori u zgradama zadržani prema izvornom projektu.

## 2. Metode

### 2.1. Studija slučaja centraliziranog toplinskog sustava u Rijeci

Analiza je provedena na studiji slučaja postojećeg CTS-a stambene četvrti Kozala u Rijeci. CTS Kozala je građen između 1969. i 1973. godine. Do 1987. godine izgrađeno je ukupno 10 višestambenih zgrada i spojeno na CTS. Izgrađene su tri zgrade s 22 kata (K1, K2 i K3) i četiri zgrade s 13 katova (K5, K6, K7 i K8). Osnovna škola (K4) izgrađena je 1970. godine. Godine 1984. izgrađena je zgrada od 16 katova (K9), a 1987. izgrađena je zgrada od 18 katova (K10). U zgradama se nalaze toplinske podstanice. Distributer toplinskom energijom vlasnik je toplane i distribucijske mreže, dok vlasnici stanova posjeduju i upravljaju toplinskim podstanicama u zgradama, cijevnom mrežom grijanja i radijatorima u zgradama. Prema korištenoj tehnologiji i vremenu izgradnje CTS-a Kozala, sustav pripada trećoj generaciji. Toplana i zgrade priključene na CTS Kozala prikazane su na slici 1.



**Slika 1.** Toplana i zgrade priključene na CTS Kozala

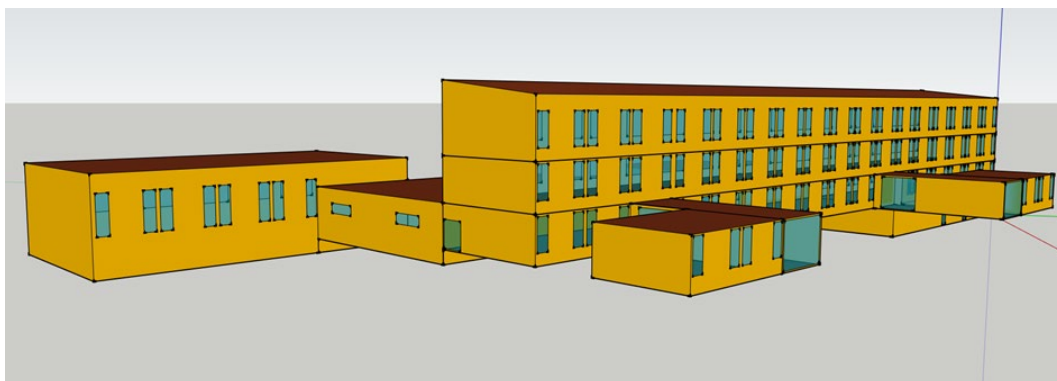
Toplana omogućuje centraliziranu opskrbu toplinskom energijom. U početnoj fazi rada CTS-a kao energent je korišteno loživo ulje. Sustav je projektiran kao vrelovodni s temperaturnim režimom  $130/70^{\circ}\text{C}$  i temperaturnom regulacijom prema temperaturi vanjskog zraka. Godine 2001. toplana je rekonstruirana kako bi se omogućilo korištenje miješanog plina (UNP-zrak), a zatim i prirodnog plina, koji se i danas koristi. Koriste se tri kotla, ukupnog toplinskog učinka  $9240\text{ kW}$ . Kotlovi rade s promjenjivom temperaturom polaznog voda, koja pri nižim vanjskim temperaturama doseže  $105^{\circ}\text{C}$ . Distribucijski sustav sastoji se od dva ogranka. Zgrade K1,



K2, K3 i K4 povezane su ogrankom duljine 354 m. Zgrade K5, K6, K8, K9 i K10 povezane su ogrankom duljine 558 m. Tijekom 2018. godine oba ogranka distributivnog sustava zamijenjena su novim cjevovodom s dvostrukim cijevima (eng. twin-pipe system) čime su smanjeni gubici topline. Nakon provedene rekonstrukcije cjevovoda u 2019. godini izmjereni gubici topline čili su 10,6% proizvedene toplinske energije, što je značajno manje u odnosu na gubitke topline iz 2018. godine, kada su gubici iznosili 19,7% proizvedene toplinske energije. Prema izmjerenim podacima distributera toplinske energije, isporučena toplinska energija izmjerena u toplinskim podstanicama tijekom 2018 g. iznosila je 4023,35 MWh, a 2019. godine 3943,14 MWh. Prosječna godišnja temperatura ogrjevnice vode u distribucijskom sustavu CTS-a iznosi 90/70°C. Toplinske podstanice za grijanje i pripremu PTV u zgradama K1, K2, K3, K4, K9 i K10 i toplinske podstanice samo za grijanje zgrada K5, K6, i K8. Zgrada K7 isključena je 2019. iz CTS-a na zahtjev suvlasnika zgrade koji nisu bili zadovoljni cijenom opskrbe toplinskom energijom. Stanovi u zgradama griju se radijatorima. Temperatura polaznog voda određuje se automatskom regulacijom ovisno o vanjskoj temperaturi zraka. Ukupna površina grijanog prostora iznosi 48455 m<sup>2</sup>. Ukupni broj stanova u zgradama CTS-a je 601.

## 2.2. Prikupljanje podataka i simulacija potrošnje energije u zgradama

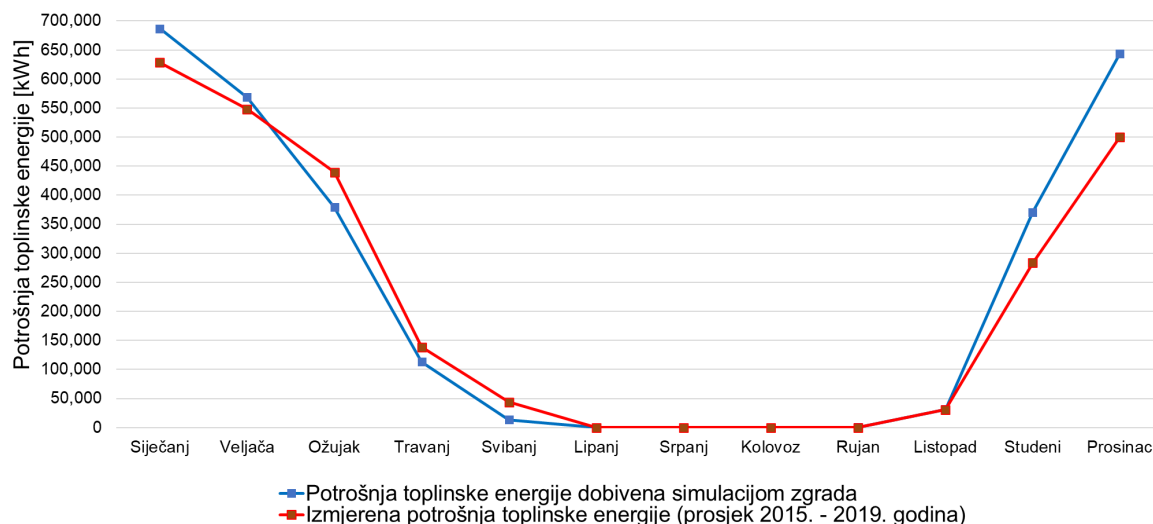
Prikupljeni su izvorni projekti zgrada spojenih na CTS s podacima o predviđenom radijatorskom grijanju, kao i podaci o trenutno ugrađenim radijatorima u zgradama jer su vlasnici stanova tijekom godina proizvoljno mijenjali ili uklanjali radijatore u svojim stanovima. Izrađeni su modeli koji simuliraju potrošnju toplinske energije za grijanje i PTV u zgradama. Analiza započinje izradom osnovnih modela zgrada s postojećim fizikalnim karakteristikama, a zatim slijedi potvrda izrađenih modela. Modeli su izrađeni pomoću programa Google Sketchup [7] i Trnsys3D dodatka [8]. Modeli su zatim uvezeni, razvijeni i ugođeni koristeći Trnsys Type 56 [9] za modeliranje višezonskih modela zgrada. Prikaz geometrije i toplinskih zona jedne od zgrada CTS-a, Osnovne škole Kozala (K4), ucrtane u sučelju programa Sketchup dan je na slici 2.



**Slika 2.** Geometrija i toplinske zone Osnovne škole Kozala (K4) u sučelju programa Sketchup

Meteorološki podaci referentne godine za grad Rijeku dobiveni su pomoću programa Meteonorm [10]. Cjelogodišnja simulacija korisne energije za grijanje zgrada provedena je s vremenskim korakom od jednog sata. Podaci s izmjerenim potrošnjama toplinske energije

za grijanje (prosjeak za pet godina od 2015. do 2019.) uspoređeni su s vrijednostima dobivenim simulacijom. Razlika u razmatranom razdoblju iznosi 11% što se može pripisati različitim meteorološkim uvjetima u razmatranom razdoblju i onima iz podataka test referentne godine. Usporedba izmjerene potrošnje toplinske energije u zgradama i vrijednosti dobivenih simulacijom prikazana je na slici 3.



**Slika 3.** Usporedba simulirane i izmjerene potrošnje toplinske energije za grijanje u zgradama (prosjeak 2015. do 2019.)

### 2.3. Centralna priprema PTV

Modeli za simulaciju toplinskih podstanica sastoje se od spremnika, izmjenjivača topline, crpki, cjevovoda i upravljačke opreme. Zgrade K1, K2 i K3, zbog svoje visine od 63 m, imaju grijanje PTV u dvije zone. Zgrade K4, K8 i K9 niže su od 60 m te imaju grijanje PTV u jednoj zoni. Temeljem izmjerenih podataka o potrošnji energije izrađen je dnevni profil potrošnje PTV-e. Isti odgovara stvarnim navikama korisnika i specifičnoj potrošnji PTV-e u stambenim zgradama, definiranoj u [11]. Provedena je usporedba simuliranih i izmjerenih vrijednosti potrošnje toplinske energije za grijanje PTV i odstupanje iznosi 2%.

### 2.4. Izračun minimalno potrebne temperature polaza u radijatorima

Sedamdesetih i ranih osamdesetih godina prošlog stoljeća kada je projektirana i izvedena većina CTS u RH, izračun gubitaka topline određivao se prema normi DIN 4701 iz 1959. godine. Normom su predviđeni dodaci na prekid grijanja, orijentaciju i visinu zgrade. Uobičajena praksa bila je da projektant proizvoljno dodatno povećava izračunati toplinski učin radijatora, čime je dodatno povećavan kapacitet radijatora. Utvrđeno je da je to slučaj u svim projektima zgrada ovog CTS-a. Smanjenjem temperature u povratnom vodu grijanja moguće su uštede energije od 14% do 16% bez dodatne intervencije na toplinskoj ovojnici zgrada [13]. Tijekom krize u sektoru toplinarstva koja je bila praćena nepovoljnim cijenama energije za grijanje, korisnici su često sami uklanjali radijatore, što je rezultiralo nepovoljnim hidrauličkim karakteristikama i neuravnoteženim cijevnim mrežama u zgradama. U nastavku je proveden izračun minimalne potrebne temperature ogrjevnice vode uz konstantan protok





vode u sustavu. Jednadžbe za izračun toplinskog učinka radijatora [12] su prijenos topline sa vode na radijator (1) i prijenos topline sa radijatora na okolni zrak (2). Indeks V označava polazni vod, R povratni vod grijanja, Z označava zrak u prostoriji, dok je n eksponent radijatora. Izjednačavanjem jednadžbi (1) i (2) uz konstantan protok  $m_1 = m_2$  i površinu radijatora  $A_1 = A_2$  mogu se odrediti temperature polaznog i povratnog voda u radijatorima.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\theta_{V,1} - \theta_{R,1}}{\theta_{V,2} - \theta_{R,2}} \quad (1)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \left[ \frac{\theta_{V,1} - \theta_{R,1}}{\ln \left( \frac{\theta_{V,1} - \theta_{Z,1}}{\theta_{R,1} - \theta_{Z,1}} \right)} \cdot \frac{\theta_{V,2} - \theta_{R,2}}{\ln \left( \frac{\theta_{V,2} - \theta_{Z,2}}{\theta_{R,2} - \theta_{Z,2}} \right)} \right]^n \quad (2)$$

### 3. Rezultati i rasprava

#### 3.1. Toplinska energija za grijanje prostora i PTV

Potrošnja toplinske energije za grijanje prostora i pripremu PTV određena je za slučaj današnjih karakteristika zgrada i za scenarij energetske obnove svih zgrada CTS-a. Energetskom obnovom preostalih zgrada koje je još nisu provele (K1, K2, K3, K9 i K10) smanjuje se potrošnja toplinske energije za grijanje za 27% (s 4225,43 MWh na 3088,11 MWh).

#### 3.2. Izračun minimalne potrebne temperature tople vode za radijatore

Toplinski učinci grijanja zgrada određeni su programom Trnsys u stacionarnim uvjetima, kao što je definirano normom EN ISO 12831 [14]. Toplinski učinci grijanja zgrada i minimalna potrebna temperatura vode u radijatorima prikazani su u tablici 1.

**Tablica 1.** Toplinski učinci grijanja zgrada za dva različita scenarija, scenarij sa postojećim stanjem ovojnice zgrada (PZ) i scenarij energetske obnove svih zgrada (EOZ).

Zgrada	Ovojnica zgrade PZ*	Ovojnica zgrade EOZ*
	Toplinski učin (kW)	Toplinski učin (kW)
K1, K2, K3	425	304
K4	231	231
K5, K6, K8	225	225
K9	370	184
K10	293	191

\*PZ—postojeće stanje ovojnica zgrada; EOZ—energetski obnovljene zgrade

Temperaturni režimi sa sniženom temperaturom vode u radijatorima pri vanjskoj temperaturi od -8°C prikazani su u tablici 2 za četiri različita scenarija: sadašnje stanje ovojnica zgrada

(PZ), energetske obnovljene zgrade (EOZ), sadašnje stanje ugrađenih radijatora (PR) i stanje s izvorno ugrađenim radijatorima u zgradama (IR).

**Tablica 2.** Temperaturni režimi sa sniženom temperaturom vode u radijatorima za četiri različita scenarija.

Ovojnica zgrade*	PZ		PZ		EOZ		EOZ	
Radijatori**	PR		IR		IR		PR	
Zgrada	$\vartheta_{\text{polaz}}$ °C	$\vartheta_{\text{povrat}}$ °C	$\vartheta_{\text{polaz}}$ °C	$\vartheta_{\text{povrat}}$ °C	$\vartheta_{\text{polaz}}$ °C	$\vartheta_{\text{povrat}}$ °C	$\vartheta_{\text{polaz}}$ °C	$\vartheta_{\text{povrat}}$ °C
K1, K2, K3	71	57	54	46	46	40	59	49
K4	63	53	52	44	52	44	63	52
K5, K6, K8	67	55	55	47	55	47	67	55
K9	71	57	56	47	41	36	49	42
K10	66	54	53	45	43	38	53	45

\*PZ—sadašnje stanje ovojnica zgrada; EOZ—energetske obnovljene zgrade \*\*PR—sadašnje stanje ugrađenih radijatora; IR—izvorno ugrađeni radijatori.

Za slučaj sadašnjeg stanja ovojnice zgrada (PZ), ukupni toplinski učinak za grijanje zgrada iznosi 2844 kW, dok se u slučaju energetske obnove preostalih zgrada (EOZ) ukupni toplinski učinak smanjuje na 2195 kW, odnosno za 23%. Energetskom obnovom zgrada K1, K2 i K3 temperatura vode u polazu za sadašnje stanje radijatora (PR) smanjuje se sa 71°C na 59°C. Za scenarij da su radijatori zadržani u skladu s izvornim projektom (IR), temperatura polaznog voda smanjuje se sa 71°C na 54°C. Za slučaj da su radijatori zadržani u skladu s izvornim projektom (IR) i da su zgrade K1, K2 i K3 energetske obnovljene (EOZ), temperatura polaznog voda smanjuje se sa 71°C na 46°C. Temperatura polaznog voda u toplovodu CTS-a mora biti minimalno 5°C viša od najviše potrebne temperature za grijanje zgrada zbog predaje topline u toplinskim podstanicama. Temperature ogrjevnice vode u toplovodu CTS-a za različite slučajeve stanja ovojnice zgrada i stanja radijatora u zgradama izračunate su za vanjske temperature -8°C, 2°C i 12°C i prikazane u tablici 3.

**Tablica 3.** Temperatura opskrbe u mreži CTS-a za različite slučajeve stanja ovojnice zgrade i stanja radijatora u zgradama pri vanjskim temperaturama zraka od -8°C, 2°C i 12°C.

Ovojnica zgrade *	PZ	PZ	EOZ	EOZ
Radijatori **	PR	IR	IR	PR
$T_{\text{polaz}}$ (°C) kod -8 °C	76	61	60	72
$T_{\text{polaz}}$ (°C) kod 2 °C	61	50	50	58
$T_{\text{polaz}}$ (°C) kod 12 °C	48	42	42	48

\*PZ—sadašnje stanje ovojnica zgrada; EOZ—energetske obnovljene zgrade \*\*PR—postojeće stanje instaliranih radijatora; IR—izvorno ugrađeni radijatori.

Temeljem izračunatih temperatura polaznog voda toplovoda za četiri različita scenarija, modernizaciju predmetnog CTS-a primjenom dizalica topline moguće je provesti u tri varijante:



- Prva varijanta podrazumijevala bi zamjenu plinskih kotlova ugradnjom centralne srednje temperaturne dizalice topline za grijanje i pripremu PTV. U toplovodu je potrebno održavati temperaturu polaza između 76°C i 65°C. U toplinskim podstanicama nema zahvata na instalaciji.
- Druga varijanta podrazumijevala bi zamjenu plinskih kotlova ugradnjom srednje temperaturne centralne dizalice topline za grijanje zgrada, te više srednje temperaturnih dizalica topline u toplinskim podstanicama za grijanje PTV. Izvan sezone grijanja u toplovodu je potrebno održavati temperaturu polaza oko 25°C.
- Treća varijanta podrazumijevala bi zamjenu plinskih kotlova ugradnjom centralne nisko temperaturne dizalica topline te više srednje temperaturnih dizalica topline za grijanje zgrada i pripremu PTV u toplinskim podstanicama. U toplovodu bi tijekom cijele godine bilo potrebno održavati temperaturu vode u rasponu 10 - 25°C.

Prva varijanta omogućuje najbržu modernizaciju CTS-a jer ne zahtijeva odlučivanje suvlasnika stanova. Trećom varijantom se ostvaruju najmanji gubici topline u toplovodu, ali predstavlja veću investiciju u odnosu na prethodne dvije varijante. Analiza opravdanosti ulaganja u različite varijante sustava uzimajući u obzir materijalne i operativne troškove bit će predmet daljnjeg istraživanja. Za drugu i treću varijantu potrebno je postići konsenzus stanara ili je potrebno mijenjati pravni okvir u kojem toplinska podstanica i instalacija grijanja u zgradama nisu u vlasništvu stanara već distributera toplinskom energijom.

#### 4. Zaključci

Cilj je rada ukazati na potencijal smanjenja temperature ogrjevnice vode u postojećim CTS-ima treće generacije. Provedena je dinamička simulacija svih zgrada postojećeg CTS-a za slučaj s postojećim karakteristikama ovojnice zgrada i slučaj energetske obnove zgrada koje je još nisu provele. Analizom je razmatrano stvarno stanje radijatora u zgradama i uspoređeno s projektiranim stanjem radijatora. Određeni su toplinski kapaciteti grijanja svih zgrada te minimalno potrebne temperature ogrjevnice vode u radijatorima i mreži CTS-a za različite scenarije za vanjske temperature -8°C, 2°C i 12°C. Energetskom obnovi preostalih zgrada u CTS-u naselja Kozala koje je još nisu provele (K1, K2, K3, K9 i K10), smanjuje se potreban ukupni toplinski učinak za grijanje zgrada za 23% odnosno sa 2844 kW na 2195 kW. Prema sadašnjem stanju ovojnice zgrada i stvarnom stanju radijatora u zgradama CTS-a naselja Kozala u gradu Rijeci moguće je smanjiti temperaturu u toplovodu s 90°C na 76°C pri vanjskoj projektnoj temperaturi. Značajan utjecaj na smanjenje temperature ogrjevnice vode ima stanje instalacije grijanja u zgradama i broj ugrađenih radijatora. U slučaju da su se zadržali radijatori prema izvornim projektima, temperaturu ogrjevnice vode u toplovodu bilo bi moguće smanjiti na 61°C pri vanjskoj projektnoj temperaturi, a uz provedenu energetska obnovu svih zgrada na 60°C. Ove radne temperature omogućuju ugradnju nisko temperaturnih i srednje temperaturnih dizalica topline ovisno o izabranom temperaturnom režimu toplovoda, dok je u toplinskim podstanicama potrebno razmotriti ugradnju dizalica topline za grijanje i pripremu PTV.

## 5. Priznanje

Ovo istraživanje je podržano potporom istraživanju br. uniri-iskusni-tehnic-23-146 „Istraživanje potencijala obnove centraliziranih toplinskih sustava korištenjem numeričkih simulacija“ Sveučilišta u Rijeci.

## 6. Literatura

- [1] An EU Strategy on Heating and Cooling. European Commission, 2016. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016DC0051&from=EN>, preuzeto 19.05.2024.
- [2] Lund, Henrik; Werner, Sven; Wiltshire, Robin; Svendsen, Svend; 4<sup>th</sup> Generation District Heating (4GDH). Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems // *Energy*, 68(2014), 1–11. (doi:10.1016/j.energy.2014.02.089)
- [3] Lund, Henrik; Østergaard, Poul Alberg; Chang, Miguel; Werner, Sven; The Status of 4<sup>th</sup> Generation District Heating: Research and Results // *Energy*, 164(2018), 147–159. (doi:10.1016/j.energy.2018.08.206)
- [4] Averfalk, Helge; Benakopoulos, Theofanis; Best, Isabelle. Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook; // *IEA-DHC*, 2021; (ISBN 978-3-8396-1745-8)
- [5] Averfalk, Helge; Werner, Sven; Essential Improvements in Future District Heating Systems // *Energy Procedia* 116(2017), 217–225 (doi:10.1016/j.egypro.2017.05.069)
- [6] Schweiger, Gerald; Heimrath, Richard; Falay, Basak; District Energy Systems: Modelling Paradigms and General-Purpose Tools // *Energy* 164(2018), 1326–1340. (doi:10.1016/j.energy.2018.08.193)
- [7] Google SketchUp Software. <https://www.sketchup.com/en/try-sketchup>
- [8] Trnsys3d Tutorial, Transsolar Energietechnik GmbH, 2012. <http://www.trnsys.de>
- [9] Trnsys 17 Multizone Building Modelling with Type 56 and TRNBuild. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2005.
- [10] Meteororm Software. <https://meteororm.com/>
- [11] Dović, Damir; Ferdelji, Nenad; Horvat, Ivan; Rodić, Alan. Algoritam za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja zgrade. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017. [https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/meteoroloski\\_podaci/Algoritam HVAC 2017.pdf](https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/meteoroloski_podaci/Algoritam_HVAC_2017.pdf), preuzeto: 19.05.2024.
- [12] Recknagel H.; Sprenger E.; Schramek R.; Čeperković D. Grejanje i Klimatizacija. Interklima, Vrnjačka Banja, 2004. 994-995 (ISBN 86-82685-13-2)
- [13] Tunzi, Michele; Østergaard, Dorte Scaarup; Svendsen, Svend.; Boukhanouf, Rabah; Cooper, Edward. Method to Investigate and Plan the Application of Low Temperature District Heating to Existing Hydraulic Radiator Systems in Existing Buildings // *Energy* 113(2016), 413–421. (doi:10.1016/j.energy.2016.07.033)
- [14] Hrvatski normativni dokument HRN EN 12831-1:2017, Energijska svojstva zgrada – Metoda proračuna projektnog toplinskog opterećenja 1. dio. <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+12831-1%3A2017>, preuzeto: 19.05.2024.



# **Energetska i ekonomska analiza zamjene energenta u sustavu grijanja višeobiteljske kuće**

## ***Energetic and economic analysis of the energy source replacement in the heating system of a multi-family house***

**B. Delač<sup>1,\*</sup>, T. Čanić<sup>1</sup>, B. Pavković<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište u Rijeci Tehnički fakultet, Vukovarska 58, 51000 Rijeka, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [boris.delac@riteh.uniri.hr](mailto:boris.delac@riteh.uniri.hr)

### **Sažetak**

U radu je razmotrena obnova sustava etažnog grijanja koji radi s plinskim kotlom ugradnjom dizalice topline. Analiza je provedena na studiji slučaja višeobiteljske kuće smještene u Zagrebu. Energetskim pregledom zgrade prikupljena je projektna dokumentacija, podaci o sustavu grijanja i potrošnji energenata koji su korišteni za izradu i provjeru simulacijskog modela zgrade te izradu modela sustava. Sve simulacije provedene su u simulacijskom sučelju Trnsys. Utvrđeni su radni temperaturni režimi u sustavu radijatorskog grijanja koji će osigurati efikasnu primjenu dizalice topline. Analiza je obuhvatila uređaje sa zrakom i vodom kao toplinskim izvorom, a dodatno je razmotrena i ugradnja fotonaponske elektrane. Rezultati pokazuju da je ugradnjom dizalice topline moguće smanjiti potrošnju primarne energije, posebno primjenom uređaja voda – voda, ali isplativost investicije ne daje atraktivan period povrata uložених sredstava čak i uz sufinanciranje. U radu je dan osvrt na aktualne cijene energenata, a analiza je proširena i na scenarij s cijenom prirodnog plina koja prati prosjek na razini EU.

**Ključne riječi:** grijanje, simulacija, plinski kotao, dizalica topline

### **Abstract**

This paper considers the replacement of a gas boiler in the central heating of apartment by a heat pump. The analysis was carried out on the basis of a case study of an apartment building in Zagreb. The energy audit was carried out to collect building documentation and data on the heating system and energy consumption. This data was used to develop and validate the simulation model of the building and the heating model. All simulations were carried out in the Trnsys simulation environment. Operating temperature conditions in radiator heating system were set to ensure the efficient implementation of heat pump. Analysis included heat pumps with air and water as a heat source and the installation of a photovoltaic system. The results show that it is possible to reduce primary energy consumption by installing a heat pump, especially by using the water-to-water unit, but the

investment in the heat pump does not offer an attractive return, even in the case of subsidization. The paper examines current energy prices and extends the analysis to scenario with natural gas price in line with the EU average.

**Key words:** heating, simulation, natural gas boiler, heat pump

## 1. Uvod

Zgrade u Europskoj uniji (EU) odgovorne su za značajan dio potrošnje energije i emisija stakleničkih plinova. Oko 80% potrošnje energije u zgradama proizlazi iz potreba za grijanje i hlađenje [1]. Više od polovice bruto potrošnje prirodnog plina u EU troši se u zgradama. Sustavi etažnog grijanja kombiniranim plinskim kotlom česti su u višeobiteljskim i višestambenim zgradama na području Republike Hrvatske (RH) iako interes za energetske učinkovite alternative, najčešće dizalice topline, raste. Dizalice topline su obnovljiv izvor energije (OIE) koji uz električnu energiju iz mreže koristi toplinsku energiju iz okoline kako bi zagrijao prostor ili vodu. Električna energija može biti proizvedena fotonaponskim (FN) sustavom čime se dobiva sustav u potpunosti zasnovan na OIE. U RH je danas moguće dobiti sufinanciranje za ugradnju dizalice topline i FN sustava. Trenutno niska cijena prirodnog plina i visoka investicija u novi sustav usporavaju tranziciju na sustave bazirane na OIE.

Zadatak ovoga rada je utvrditi energetske i ekonomske potencijale obnove sustava etažnog grijanja višeobiteljske kuće ugradnjom dizalice topline. Analiza je provedena na studiji slučaja, višeobiteljskoj kući smještenoj u Zagrebu.

## 2. Studija slučaja

### 2.1. Opis zgrade i postojećeg sustava grijanja

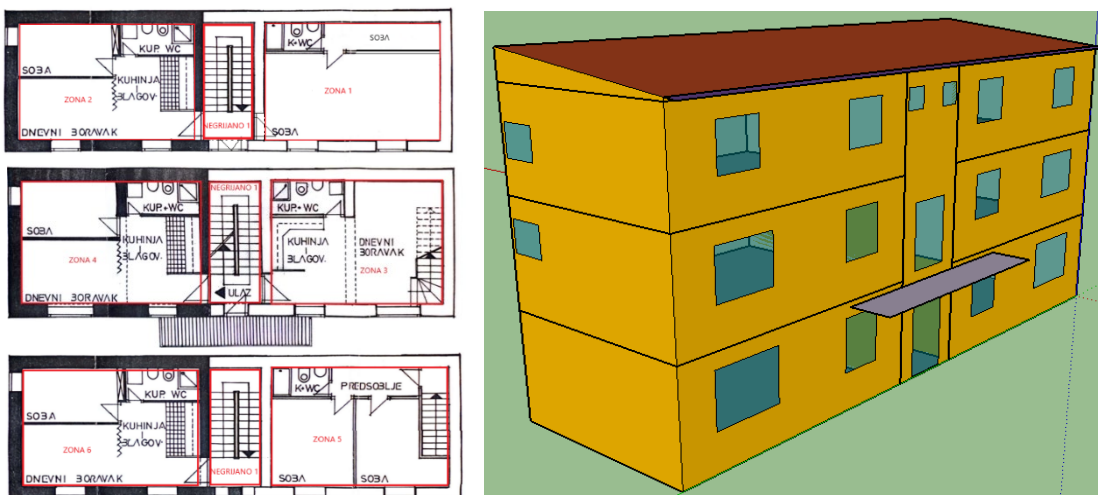
Obiteljska kuća nalazi se u četvrti Trnje u Zagrebu. Izgrađena je 1938. godine, a adaptirana 1998. godine. Ima tri stambene etaže i tavan. Ukupna stambena površina iznosi 222 m<sup>2</sup>. Kuća je podijeljena na 4 stana u vlasništvu dvije obitelji: 2 stana od 37 m<sup>2</sup> i 2 stana od 74 m<sup>2</sup>. Jedan stan od 37 m<sup>2</sup> danas se ne koristi i neće biti razmatran u ovom istraživanju.

U svakom stanu postavljen je kombinirani plinski kotao. Sustav grijanja radi u temperaturnom režimu 60/50°C. Prostor se grije na 20°C putem radijatora. Prostor se hlade kompresijskim rashladnim uređajima u razdvojenoj izvedbi. U ovoj analizi, hlađenje objekta i obnova sustava hlađenja neće biti razmatrani.

### 2.2. Toplinski model zgrade i provjera modela

Simulacija potrošnje energije u zgradi provedena je višezonskim toplinskim modelom simulacijskog sučelja Trnsys [2]. Model se temelji na energetske bilanci toplinske zone. Zona predstavlja zatvoreni volumen zraka omeđen zidovima, podom i stropom. Objekt je podijeljen na 8 toplinskih zona, ovisno o namjeni i orijentaciji prostora. Šest zona predstavlja stambeni prostor, a 2 zone pomoćni prostor (stubište i tavan). Svaka zona označena je crvenim pravokutnikom na slici 1.

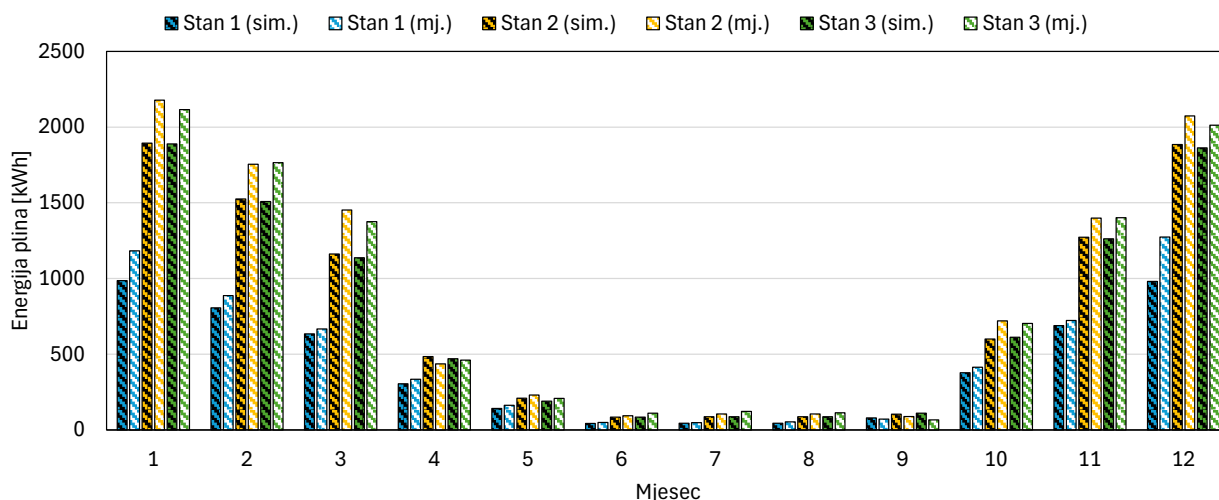
Za svaki građevni element definirani su slojevi, debljina sloja i koeficijenti konvektivnog prijelaza topline s vanjske i unutarnje strane. Svi prozori su s dvostrukim izolirajućim staklom. Broj izmjena zraka uslijed infiltracije i minimalnog provjetravanja određen je prema literaturi [3] te iznosi  $0,54 \text{ h}^{-1}$ . Unutarnji dobici topline iznose  $5 \text{ W/m}^2$ . Sezona grijanja traje od 1. do 5. mjeseca te od 9. do 12. mjeseca. Energija za grijanje računa se za svaki vremenski korak simulacije u kojem je temperatura zone niža od  $20^\circ\text{C}$ . Sukladno stvarnom načinu korištenja grijanje je isprekidano (svaki dan, od 7 do 22 sata).



**Slika 1.** Tlocrti stambenih etaža obiteljske kuće (lijevo) i model zgrade podijeljen u toplinske zone (desno)

Simulacija u projektnim uvjetima provedena je kako bi se odredio učinak dizalica topline koja će zamijeniti postojeći kotao u svakom od sustava grijanja [4]. Za grijanje stana 1 potreban je učinak od  $3,3 \text{ kW}$ , a za stanove 2 i 3 po  $6,2 \text{ kW}$ . Specifični učinak za grijanje kreće se od  $84$  do  $88 \text{ W/m}^2$ .

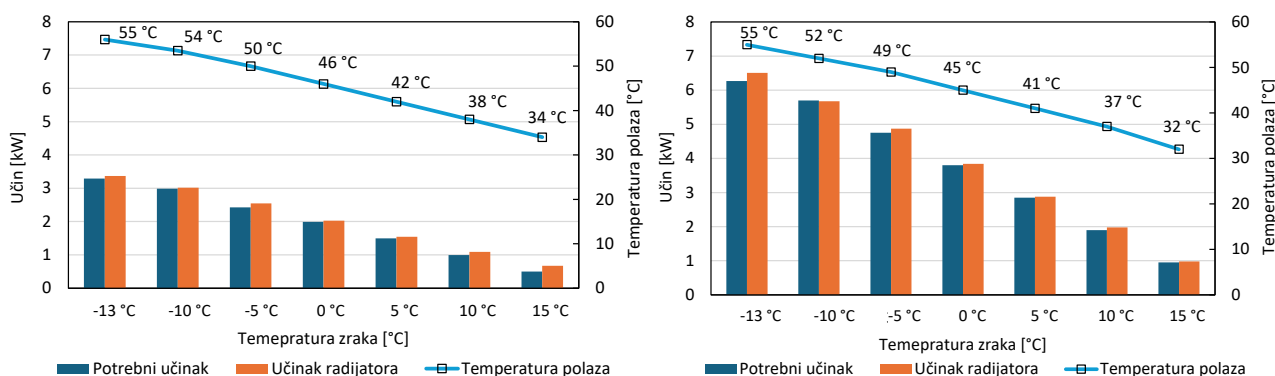
Provedena je cjelogodišnja simulacija s vremenskim korakom od 1 sat s meteorološkim podacima test referentne godine za lokaciju Zagreb. Uz praćenje zadanih temperatura u prostorima tijekom godine, ispisana je korisna energija za grijanje za svaki sat u godini, a rezultati za svaku od zona dodijeljeni su cjelini kojoj pripadaju (stambenoj jedinici) i integrirani u periodu od jednog mjeseca. Specifična toplina za grijanje stanova kreće se od  $112$  do  $125 \text{ kWh/m}^2$  godišnje. Uz prosječni stupanj djelovanja  $0,85$  za sustav s plinskim kotlom i radiatorima dobivena je finalna energija plina za grijanje. Godišnje potrebna energija za zagrijavanje PTV izračunata je za svaki stan, a potrošnja razdijeljena na mjesec u godini [3]. Uz usvojen stupanj djelovanja plinskog kotla od  $0,9$  izračunata je finalna energija plina za zagrijavanje PTV. Radi potvrde simulacijskog modela, ovako dobivena finalna energija plina uspoređena je sa stvarnom potrošnjom plina u 2022. godini. Osim za grijanje i PTV, plin se koristi i za kuhanje. Ta potrošnja ovisi o navikama korisnika, ali u ovakvim sustavima predstavlja tek manji dio. Prosječno godišnje odstupanje modelirane potrošnje je  $11,6\%$  manje od mjerene potrošnje što se može pripisati potrošnji plina za kuhanje i ukazuje da je model prikladan za daljnje analize (slika 2).



**Slika 2.** Usporedba modeliranja i stvarne potrošnje plina

### 2.3. Podsustav predaje toplinske energije

U prostorima su postavljeni radijatori Lipovica SOLAR 500/80. Utvrđeno je da postavljeni radijatori imaju rezervu učinka koja se kreće između 20 i 30%, pa je moguće temperaturu u prostoru održavati i uz sniženu temperaturu polaznog voda [5]. Proveden je niz simulacija kod temperatura vanjskog zraka u rasponu od -12,8 do 15°C da bi se odredio potreban učin u grijanju i novi temperaturni režim radijatorskog grijanja koji bi radio s nižom temperaturom vode u polazu, a pri tome zadovoljio zahtijevani učinak. Za temperaturni režim zadržana je promjena temperature vode od 10 K. Iz rezultata se vidi da je moguće regulirati temperaturu polaza grijanja u rasponu od 53 do 30°C za stan 1, odnosno od 52 do 30°C za stanove 2 i 3 (slika 3).



**Slika 3.** Mogućnost snižavanja temperature vode u sustavu grijanja ovisno o temperaturi vanjskog zraka – stan 1 (lijevo) i stan 2 / 3 (desno)

Predviđen je akumulacijski sustav pripreme PTV. Voda ulazi s temperaturom 13,5 °C, a zagrijava se na 40 °C. Dnevna potrošnja tople vode iznosi 55 l za stan 1, odnosno 110 l za stanove 2 i 3. Za stan 1 potreban je spremnik volumena 60 litara i cijevni grijač učinka 1,4 kW, a ta stanove 2 i 3 spremnici od 100 litara s grijačem učinka 2,1 kW.



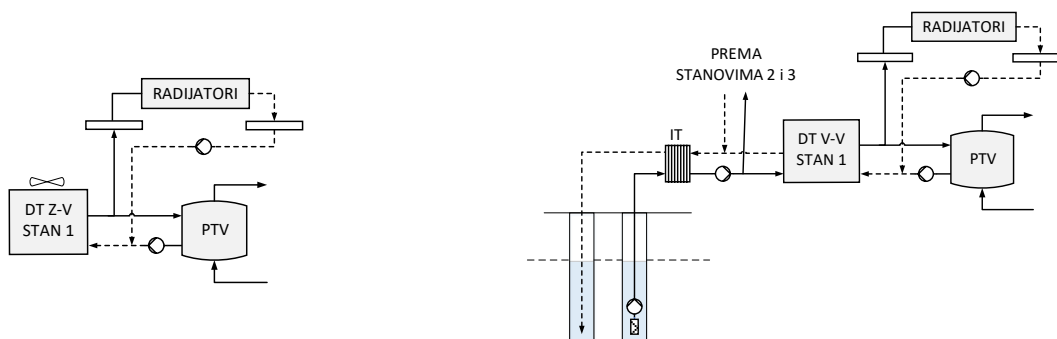
## 2.4. Sustav grijanja s dizalicom topline

U svakom od stanova predviđena je ugradnja jedne dizalice topline koja zamjenjuje postojeći kotao. Razmatrani su uređaji sa zrakom i vodom kao izvorom topline. Ukupni potrebni učinci uređaja u projektnim uvjetima su: 4,7 kW (stan 1) i 8,3 kW (stanovi 2 i 3).

Zrak je najdostupniji izvor topline za dizalice topline. Uređaji su jednostavne konstrukcije i ne zahtijevaju složenu instalaciju. Obzirom na dostupno mjesto za ugradnju dizalice topline izvan objekta, predviđena je ugradnja uređaja zrak - voda u monoblok izvedbi.

Lokacija zgrade je u blizini rijeke Save gdje postoji potencijal korištenja topline podzemne vode kao izvora topline za dizalice topline voda - voda. Temperatura podzemne vode kreće se između 8 °C i 12 °C, ovisno o dubini s koje se crpi. Za iskorištenje su potrebni crpni i ponorni bunar. Obzirom na potrebne učinke u objektu i raspoloživost prostora ispred objekta, predviđa se bušenje po jednog crpnog i ponornog bunara za potrebe svih sustava u zgradi. Toplina s podzemne vode prenosi se putem izmjenjivača topline na vodeni krug izvora topline razveden do svakog od stanova. U svakom od stanova predviđena je ugradnja dizalice topline voda – voda.

Izrađeni su simulacijski modeli predloženih sustava. Za svaki od uređaja korištenjem podataka proizvođača izrađena je tzv. mapa efikasnosti koja sadrži podatke o raspoloživom učinku i potrebnoj električnoj snazi u promjenjivim uvjetima rada. Tako je moguće ovisno o temperaturi vanjskog zraka ili temperaturi podzemne vode te temperaturi u sustavu grijanja simulirati rad uređaja. Jednostavne sheme sustava s dizalicama topline za jedan od stanova prikazane su na slici 4.



**Slika 4.** Shema sustava s dizalicom topline zrak – voda (lijevo) i voda- voda (desno)

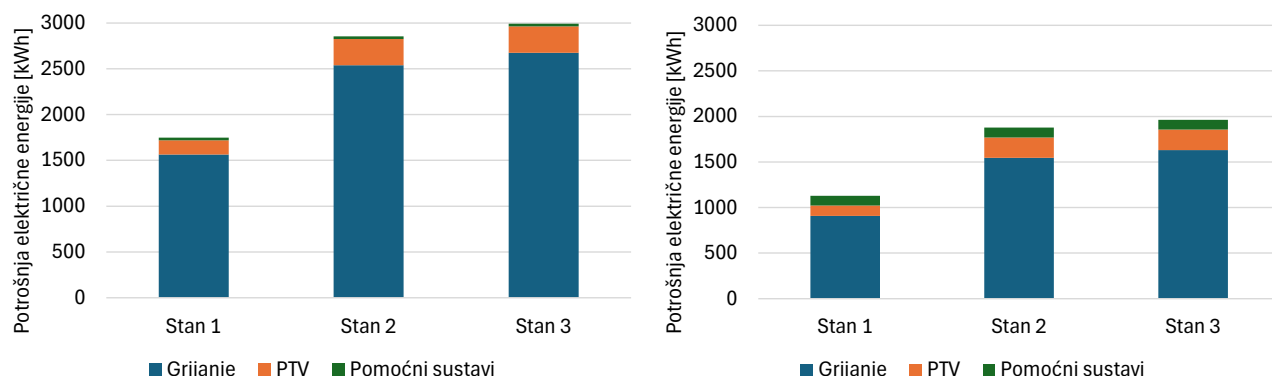
## 2.5. FN sustav

Razmotreno je postavljanje FN elektrane koja bi svojim radom pokrivala potrošnju električne energije sustava grijanja. Dimenzije krova su 5,5 m x 18 m, nagib 11°, a orijentacija je zapadna. Odabran je model FN panela proizvođača Luxor tip M144/545W s deklariranom učinkovitosti od 21,5% [7]. Na krov je moguće postaviti do 30 panela, a konačni broj panela određen je nakon simulacije sustava s dizalicama topline.

## 3. Rezultati

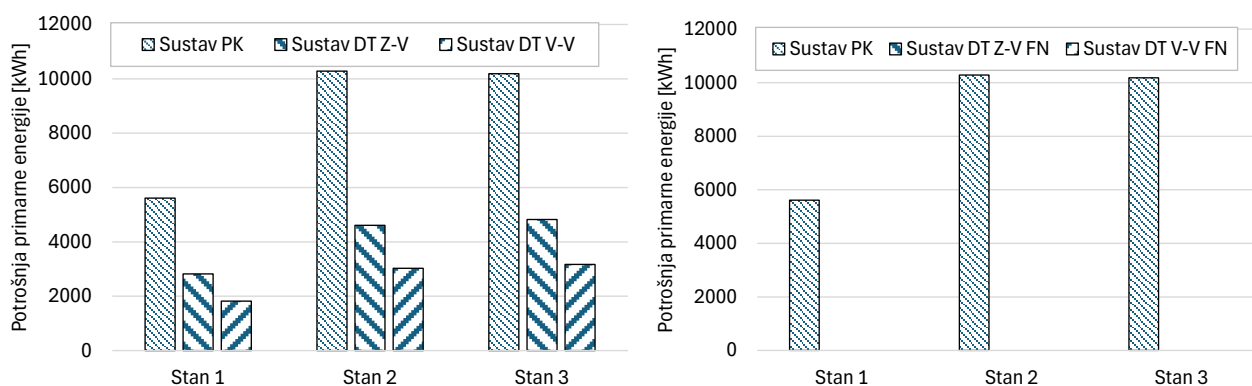
Tijekom provođenja simulacija praćene su zadane temperature u sustavu grijanja, PTV te temperature toplinskih zona. Kao rezultat ispisana je potrošnja električne energije svih

potrošača u sustavu te proizvedena toplinska energija za grijanje i PTV. Na slici su usporedno prikazani rezultati za potrošnju električne energije sustava s dizalicom topline zrak – voda i voda – voda za svaki od stanova (slika 5).



**Slika 5.** Potrošnja električne energije sustava s dizalicama topline zrak – voda (lijevo) i voda – voda (desno)

Sustavi s uređajima zrak – voda troše manje električne energije od sustava s uređajima voda – voda zbog povoljnije temperature toplinskog izvora. Sezonski faktori grijanja (SCOP) kreću se u rasponu 2,51 – 2,72 za grijanje prostora odnosno 2,95 – 3,22 za grijanje PTV uređajima zrak – voda, te 4,32 – 4,46 za grijanje prostora odnosno 4,05 – 4,13 za grijanje PTV uređajima voda – voda. Niža efikasnost kod grijanja PTV posljedica je niže temperature toplinskog izvora tijekom godine. Iz simulirane potrošnje električne energije određena je veličina FN elektrane. Ukupno je potrebno 26 modula za sustave s dizalicom topline zrak – voda, odnosno 18 modula za sustave s dizalicom topline voda – voda. Korištenjem faktora primarne energije za RH [8] izračunata je potrošnja primarne energije sustava, i to u varijantama sa i bez FN sustava. Sustavi s dizalicama topline značajno smanjuju potrošnju primarne energije, a u slučajevima s FN elektranom potpuno je pokrivena potrošnja primarne energije (slika 6).



**Slika 6.** Potrošnja primarne energije u slučaju bez FN elektrane (lijevo) i s FN elektranom (desno)

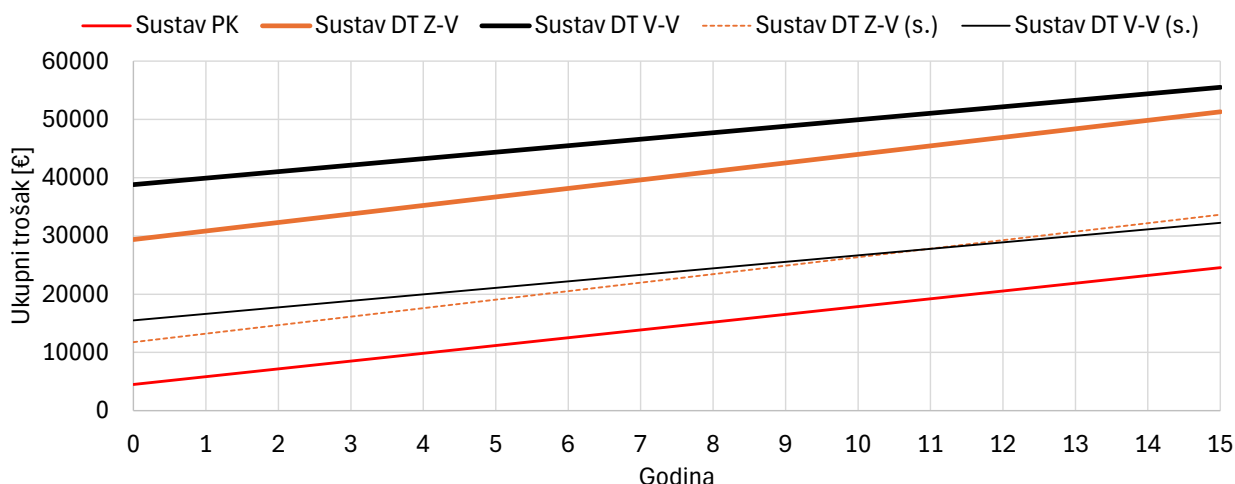


Troškovi sustava razmatrani su u periodu od 15 godina. Obuhvaćeni su investicijski i pogonski troškovi, te troškovi održavanja. Cijene su dobivene od dobavljača i izvođača radova. Pretpostavljeno je da vlasnici koriste vlastita sredstva za investiciju u sustav. Kako je za očekivati da će kombinirane plinske kotlove ugrađene u stanove 1998. godine s vremenom trebati zamijeniti novima, kod ovog sustava uključena je troška dobave novog standardnog plinskog kotla.

Korištena je cijena plina dobavljača Gradska plinara Zagreb koja uključuje cijenu za energent (0,04326 €/kWh) i fiksnu mjesečnu naknadu (1,3965 €/mj.) [9]. Troškovi za električnu energiju izračunati su prema troškovniku HEP za kućanstvo, bijeli tarifni model (viša tarifa 0,152 €/kWh, niža tarifa 0,0797 €/kWh, mjesečna naknada 1,11 €/mj.) [10]. Iako je FN sustav povezan na mrežu, prihod od otkupa električne energije je zanemaren jer je FN sustav dimenzioniran da pokriva potrošnju električne energije termotehničkog sustava. Za sustav s dizalicama topline voda-voda u pogonski trošak uključen je zahvata podzemne vode u iznosu 0,0132 €/m<sup>3</sup> [11]. Troškovi održavanja ocijenjeni su prema aktualnim cijenama za godišnje održavanje plinskih kotlova i dizalica topline. Subvencioniranje ugradnje dizalica topline i FN elektrane određeno je u skladu s vrijednosti investicije i uvjetima natječaja. Troškovi u svim varijantama sustava prikazani su u tablici 2. Troškovi tijekom perioda razmatranja za sustave bez FN elektrane u prikazani su na slici 7.

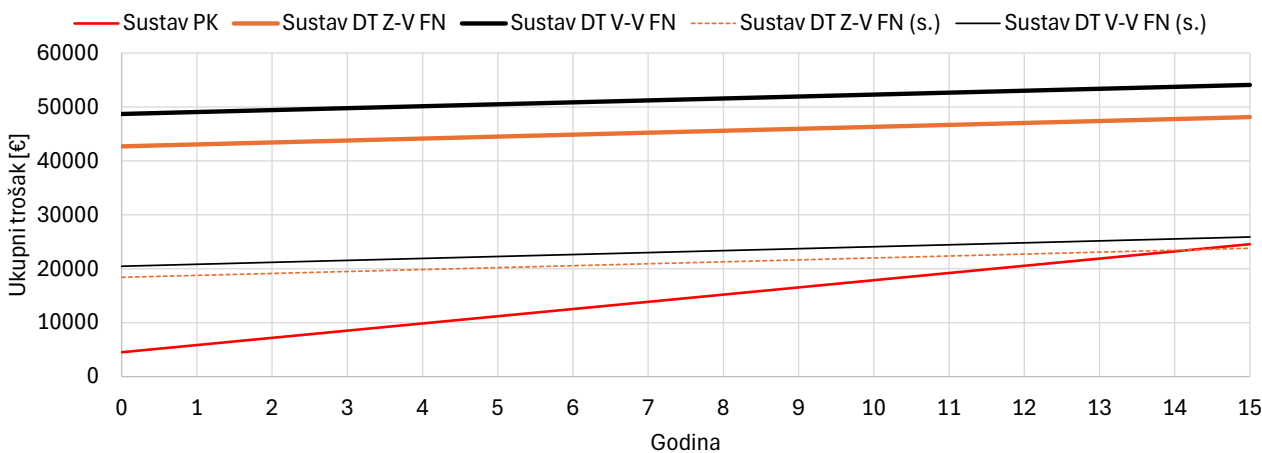
**Tablica 2.** Troškovi za razmatrane varijante (PK – plinski kotao, DT Z-V – dizalica topline zrak – voda, DT V-V – dizalica topline voda – voda)

Sustav	Stan 1	Stan 2	Stan 3
Investicijski troškovi korisnika [€]			
Sustav PK	1500	1500	1500
Sustav DT Z-V (bez subvencija)	7400	11000	11000
Sustav DT V-V (bez subvencija)	11800	13500	13500
Sustav DT Z-V (subvencionirano)	2960	4400	4400
Sustav DT V-V (subvencionirano)	4720	5400	5400
Sustav DT Z-V FN (bez subvencija)	10700	16000	16000
Sustav DT V-V FN (bez subvencija)	14300	17200	17200
Sustav DT Z-V FN (subvencionirano)	4610	6900	6900
Sustav DT V-V FN (subvencionirano)	5970	7250	7250
Pogonski troškovi [€]			
Sustav PK	238	423	419
Sustav DT Z-V	253	413	433
Sustav DT V-V	171	286	299
Troškovi održavanja [€]			
Sustav PK	85	85	85
Sustav DT Z-V	120	120	120
Sustav DT V-V	120	120	120



**Slika 7.** Troškovi tijekom perioda razmatranja – sustavi bez FN elektrane

Troškovi su prikazani na razini zgrade, iako jednak trend pokazuju i rezultati na razini stambene jedinice. Troškovi pogona i održavanja sustava voda – voda niži su od onih kod sustava s plinskim kotlom, dok su za sustav zrak – voda viši. Razlog tome je niska cijena plina te različite efikasnosti sustava s dizalicama topline. Visoka investicija za sustave s dizalicama topline ne može se kompenzirati nižim pogonskim troškovima za sustav DT V-V. Sufinanciranje sustava s dizalicama topline snižava ukupni trošak, ali niti taj scenarij ne daje najniže ukupne troškove. Rezultati za varijante sustava s FN elektranom prikazani su na slici 8.

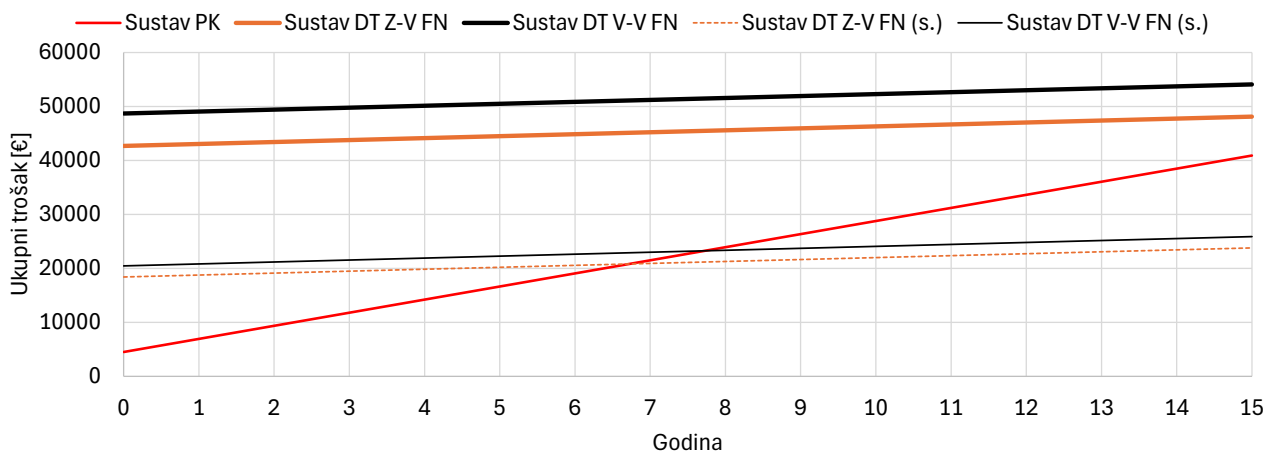


**Slika 8.** Troškovi tijekom perioda razmatranja – sustavi s FN elektranama

Prednost nad sustavom s plinskim kotlovima postiže se tek nakon 14. godina i to u scenariju uz sufinanciranje investicije u sustav s dizalicama topline zrak – voda. Kako je investicija za sustave s dizalicom topline zrak – voda i FN elektranom zbog jednostavnosti sustava niža od one za sustave s uređajima voda – voda i FN elektranom, ukupni troškovi su niži za sustav s uređajima zrak – voda.

Uzrok nepovoljne investicije u dizalicu topline i FN sustav može se pripisati odnosu cijene prirodnog plina i električne energije po utrošenom kWh energenta, gdje je cijena za kWh prirodnog plina 3,5 puta niža nego kWh električne energije. Proizlazi da bi sustavi s dizalicama topline morali biti izuzetno efikasni i pristupačni da bi mogli dati niže ukupne troškove. Trenutna cijena prirodnog plina za kućanstva je zaštićena, regulirana je od strane RH i određenom nizom mjera. Očekuje se da se ista neće mijenjati do početka 2025. godine. Kućanstva u RH trenutno plaćaju gotovo najnižu cijenu za kWh energije prirodnog plina na prostoru EU [12]. Cijena plina se u RH nije značajnije mijenjala dulji niz godina, pa čak ni tijekom energetske krize 2022. godine kada se u nekim zemljama članicama cijena i udvostručila. Prosječna cijena od 0,0891 €/kWh na razini EU je i više nego dvostruka u odnosu na trenutnu u RH. Cijena električne energije za kućanstva u RH također je niža od prosjeka EU, i među nižima je u EU [13].

U nastavku je prikazan scenarij s cijenom prirodnog plina na razini EU prosjeka. Promjena cijene električne energije nije razmatrana jer se električna energija za pogon sustava proizvodi radom FN elektrane i ne predstavlja pogonski trošak sustava. Kako su se u ovom scenariju pogonski troškovi sustava s plinskim kotlom udvostručili, ukupni trošak na kraju perioda je veći, pa sustavi s dizalicama topline imaju kraći period povrata. Investicija u sustav s uređajima zrak voda isplati se u 6. godini rada sustava, dok se kod uređaja voda – voda investicija isplati krajem 7. godine perioda razmatranja (slika 9).



**Slika 9.** Troškovi tijekom perioda razmatranja – sustavi s FN elektranama i cijenom prirodnog plina na razini EU prosjeka

#### 4. Zaključak

Analiza na razmatranom slučaju višeobiteljske kuće pokazuje da se s trenutnom cijenom prirodnog plina za kućanstva u RH ne može se postići prihvatljiv period povrata investicije u sustav s dizalicom topline zrak – voda ili voda – voda. Trenutna cijena plina u RH je niska i među najnižima na prostoru EU, ali za očekivati je da će ona s vremenom rasti. S druge strane, za ugradnju dizalice topline s FN elektranom danas se mogu dobiti subvencije i takav sustav predstavlja održivo rješenje obzirom da može proizvesti električnu energiju za svoj pogon i smanjuje potrošnju primarne energije. Iako je podzemna voda povoljniji toplinski

izvor od zraka na području kontinentalne Hrvatske, u ovom slučaju se zbog složenosti sustava pokazalo da sustav s uređajima zrak – voda pokazuje kraći period povrata investicije.

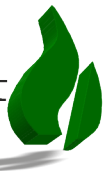
U konačnici, unatoč niskoj cijeni prirodnog plina, važno je razmotriti dugoročne koristi i ekološke aspekte. Dizalice topline nude energetske učinkovitost, smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i doprinose očuvanju okoliša. Stoga, pri donošenju odluke o zamjeni kotla, potrebno je pažljivo analizirati sve faktore i uzeti u obzir dugoročne dobrobiti za stanare, okoliš i društvo u cjelini.

## 5. Priznanje

Ovo istraživanje je podržano potporom istraživanju br. uniri-iskusni-tehnic-23-146 „Istraživanje potencijala obnove centraliziranih toplinskih sustava korištenjem numeričkih simulacija“ Sveučilišta u Rijeci.

## 6. Literatura

- [1] The role of the heating and cooling sector in the EU 2040 climate and energy framework, joint non-paper by Latvia, Austria, Cyprus, Denmark, Estonia, France, Ireland, Greece, Lithuania, Luxembourg, Malta, Portugal, Slovakia, Slovenia, Spain, 14 May 2024
- [2] Klein, S.A. et al, 2017, TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [3] Dović, Damir et al. Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama, Zagreb, svibanj 2017.
- [4] EN 12831:2003 Sustavi grijanja u građevinama - Postupak proračuna normiranog toplinskog opterećenja, Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2004.
- [5] Lipovica, <https://lipovica.hr/proizvodi/radijatori/solar/>, pristup: 9. 7. 2024.
- [6] Aermec, <https://global.aermec.com/en/download/product-selection/>, pristup: 9. 7. 2024.
- [7] Luxor solar, <https://www.luxor.solar/en/solar-modules/eco-line/eco-line-half-cell.html>, pristup: 9. 7. 2024.
- [8] Faktori primarne energije i emisija CO<sub>2</sub>, [https://mpgi.gov.hr/UserDocImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/meteoroloski\\_podaci/FAKTORI\\_primarne\\_energije.pdf](https://mpgi.gov.hr/UserDocImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/meteoroloski_podaci/FAKTORI_primarne_energije.pdf), pristup: 9. 7. 2024.
- [9] GPZ Opskba, [https://www.gpz-opskrba.hr/pregled-cijena-po-distribucijskim-podrucjima-gpz-opskrbe/1735?energetski\\_subjekt\\_id=1](https://www.gpz-opskrba.hr/pregled-cijena-po-distribucijskim-podrucjima-gpz-opskrbe/1735?energetski_subjekt_id=1), pristup: 9. 7. 2024.
- [10] HEP Elektra, <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>, pristup: 9. 7. 2024.
- [11] Uredba o visini naknade za korištenje voda, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010\\_07\\_82\\_2335.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_07_82_2335.html), pristup: 9. 7. 2024.
- [12] Eurostat, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_pc\\_202/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_202/default/table?lang=en), pristup: 9. 7. 2024.
- [13] Eurostat, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_pc\\_204/default/bar?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204/default/bar?lang=en), pristup: 9. 7. 2024.



# Čimbenici motivacije ugradnje sustava upravljanja energijom *Motivation Factors for Installation of Energy Management System*

F.Ambrinac<sup>1</sup>, G. Knežević<sup>2,\*</sup>, D. Topić<sup>2</sup>, N. Mišljenović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Glovia d.o.o., Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup>Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: goran.knezevic@ferit.hr

## Sažetak

Problemi u ostvarivanju ciljeva Europske Unije u pogledu postizanja ravnoteže, održivosti i učinkovitosti elektroenergetskog sustava postaju sve veći zbog veće integracije obnovljivih izvora energije i električnih vozila te trenda povećanja potrošnje energije. Dio uzrokovanih problema može se riješiti povećanjem fleksibilnosti na strani potražnje, posebno imajući u vidu da je veća potrošnja energije povezana s vršnom potražnjom i mogućim zagušenjima mreže. Fleksibilnost na strani potražnje može se ostvariti instaliranjem sustava upravljanja energijom. Takvi sustavi predstavljaju skup različitih tehničkih, tehnoloških i programskih rješenja koji za cilj imaju racionalizirati potrošnju energije i povećati energetske učinkovitost i fleksibilnost sustava. Ako se analizira motivacija krajnjih potrošača za ugradnju sustava upravljanja energijom, može se utvrditi da je ona rezultat različitih čimbenika koji se mogu podijeliti na ekonomske, moralne (ekološke), psihološke i društvene. Ekonomski čimbenici motivacije tradicionalno se smatraju najvažnijima, no novija saznanja pokazuju da oni sami po sebi nisu dovoljni za odluku o ugradnji sustava upravljanja energijom. U ovom radu opisani su čimbenici motivacije ugradnje sustava upravljanja energijom. Nadalje, prikazani su rezultati istraživanja motivacije ugradnje sustava upravljanja energijom provedenog u obliku anketnog upitnika u kojem je sudjelovalo 107 ispitanika. Za većinu ispitanika ekonomski čimbenici pružaju najznačajniji motiv za ugradnju sustava upravljanja energijom, međutim, primjećuje se da su moralni i društveni čimbenici također vrlo značajni. Rezultati pokazuju da je manji broj ispitanika spreman mijenjati svoje navike i rutine ako nema dostupne određene energente u određeno vrijeme na zahtjev dobavljača. S druge strane, veći broj ispitanika, njih 63,6% pristalo bi na automatsko upravljanje električnim uređajima bez narušavanja komfora. Sličan postotak ispitanika motivirani bi bili lakom i jednostavnom uporabom sustava te nepostojanjem potrebe za održavanjem. Uz to, valja izdvojiti da je gotovo polovica ispitanika izjavila kako bi se svojim sustavom upravljanja energijom odmah pohvalili osobama iz njihovih društvenih grupa.

**Ključne riječi:** sustav upravljanja energijom, čimbenici motivacije, anketa



## Abstract

The problems in achieving the objectives of the European Union in terms of achieving balance, sustainability and efficiency of the electric power system are becoming greater due to greater integration of renewable energy sources and electric vehicles and the trend of increasing energy consumption. Part of the caused problems can be solved by increasing flexibility on the demand side, especially considering that higher energy consumption is associated with peak demand and possible network congestion. Flexibility on the demand side can be achieved by installing an energy management system. Such systems represent a set of different technical, technological and software solutions aimed at rationalizing energy consumption and increasing the energy efficiency and flexibility of the system. If the motivation of end consumers to install an energy management system is analyzed, it can be determined that it is the result of various factors that can be divided into economic, moral (ecological), psychological and social. Economic factors of motivation are traditionally considered the most important, but recent findings show that they are not sufficient for the decision to install an energy management system. This paper describes the factors motivating the installation of an energy management system. Furthermore, the results of the research into the motivation of installing an energy management system conducted in the form of a questionnaire in which 107 respondents participated are presented. For the majority of respondents, economic factors provide the most significant motive for installing an energy management system, however, it is noted that moral and social factors are also very significant. The results show that a smaller number of respondents are ready to change their habits and routines in such a way that certain energy products are not available at a certain time at the request of the supplier. On the other hand, a larger number of respondents, 63.6% of them, would agree to automatic control of electrical devices without disturbing comfort. A similar percentage of respondents would be motivated by the easy and simple use of the system and the absence of the need for maintenance. In addition, it should be noted that almost half of the respondents stated that they would immediately brag about their energy management system to people from their social groups.

**Key words:** energy management system, motivation factors, survey

## 1. Uvod

Izazovi u ostvarivanju ambicioznih ciljeva Europske unije koji se odnose na postizanje ravnoteže, sigurnosti, održivosti i učinkovitosti elektroenergetskog sustava sve su veći zbog integracije obnovljivih izvora energije i električnih vozila te povećanja potrošnje. Fleksibilnost na strani potražnje obično se smatra ključnom, posebno imajući u vidu da je veća potrošnja energije povezana s vršnim zahtjevima u potražnji i mogućim zagušenjima mreže [1]. Fleksibilnost se može ostvariti instaliranjem sustava upravljanja energijom koji predstavljaju skup različitih tehničkih, tehnoloških i programskih rješenja koji za cilj imaju racionalizirati potrošnju energije i povećati energetske učinkovitost i fleksibilnost sustava. Motivacija krajnjih potrošača za integraciju ovakvih sustava rezultat je različitih čimbenika. U literaturi





[2] autor ističe da se standardni pristupi upravljanju energetsom učinkovitošću kućanstava obično usredotočuju na ekonomske čimbenike. U literaturi [3] autori navode da su odgovori potrošača na informacije i cijene složeniji nego što sugerira standardna ekonomska analiza te i druge motivacije potiču ljude na ugradnju sustava upravljanja energijom. U radu [4] autor navodi kako se pri odabiru načina potrošnje energije ljudi uz racionalnu argumentaciju koriste i od prije naučenim obrascima ponašanja. Takvi načini odlučivanja, radi uštede energije i vremena, ne uzimaju u obzir sve opcije, već na temelju evolucijski ili iskustveno najefikasnijih obrazaca, selekcijski proces usmjeravaju prema rješenju koje je na probabilističkoj razini najefikasnije. Autor u radu [5] navodi da se umjesto zadržavanja fokusa na individualnoj potrošnji radije treba koncentrirati na pojavu i transformaciju društvenih normi jer su one ključne za obrasce potrošnje s različitim posljedicama za resurse i okoliš. U radu [6] objašnjena je bihevioralna ekonomija za koju autori navode da se može definirati i kao ekonomski model koji se bavi načinom na koji osjećaji i mentalni procesi ljudi utječu na donošenje ekonomskih odluka. Ova znanstvena disciplina spaja psihologiju, sociologiju i ekonomiju te između ostaloga analizira zašto ljudi nisu racionalna bića te često rade i na svoju štetu. U radu [7] autori navode kako društveni čimbenici koji dolaze iz društva, odnosno društvenih odnosa i obrazaca ponašanja, utječu na donošenje odluke o ugradnji sustava upravljanja energijom. Individualne odluke i odluke u kućanstvu nikada se ne donose u „vakuumu“, već društveni kontekst vrlo često utječe na ponašanje povezano s potrošnjom energije.

Ovaj rad proizašao je iz diplomskog rada „Društveni čimbenici motivacije ugradnje sustava upravljanja energijom“ autora Filipa Ambrinca [8]. U radu opisani su čimbenici motivacije ugradnje sustava upravljanja energijom u poglavlju 2. U poglavlju 3 prikazani su rezultati istraživanja motivacije ugradnje sustava upravljanja energijom provedenog u obliku anketnog upitnika u kojem je sudjelovalo 107 ispitanika. U poglavlju 4 dan je zaključak rada.

## 2. Motivacijski čimbenici upravljanja potrošnjom energije

Motivacijski čimbenici za ugradnju sustava upravljanja energijom mogu se podijeliti u različite skupine, među kojima posebno valja izdvojiti sljedeće [9]:

- ekonomski,
- moralni/okolišni,
- psihološki,
- društveni.

**Ekonomski** se čimbenici odnose na očekivane financijske koristi od promjene obrasca ponašanja u potrošnji energije. Najčešće se odnose na uštede na računima za energiju, no mogu uključivati i druge pogodnosti kao što je program vjernosti, odnosno skupljanje bodova određenim poželjnim ponašanjem koji se onda mogu zamijeniti za određene nagrade. U ekonomske čimbenike koji utječu na motiviranost mogu se ubrojiti i troškovi ulaganja i održavanja u sustav upravljanja energijom. Rezultati brojnih istraživanja pokazuju da su ovi čimbenici najznačajniji čimbenik motivacije. Međutim, učinkovite uštede energije, koje su obično relativno male, često zahtijevaju velika početna ulaganja, kao što je, na primjer, poboljšanje toplinske izolacije kuće. Uštede se ostvaruju nakon dugo vremena, često

nekoliko godina [7]. Uvidom u rezultate brojnih istraživanja zaključuje se kako ispitanici najčešće navode da bi ih na ugradnju sustava za upravljanje energijom motivirale uštede i financijske koristi, no ispitanici često nisu svjesni koliko je dugo vremena potrebno da te uštede opravdaju ulaganja. S obzirom da su pojedinci manje skloni čekanju za ostvarivanje dobitaka u budućnosti, odluka o ulaganju u bolju energetska opciju iz čisto ekonomskih razloga nije vjerojatna.

Umjesto ekonomskih motivacijskih čimbenika, smatra se kako veći utjecaj na promjenu ponašanja potrošača energije imaju drugi motivacijski čimbenici. Na primjer, **moralni/okolišni** se čimbenici smatraju visoko utjecajnim za promjenu ponašanja koje utječe na okoliš (npr. za recikliranje i smanjenje potrošnje energije). Moralni čimbenici motivacije korisnika potiču na moralno prihvatljivo ponašanje prema društvu, okolišu i održivom razvoju.

**Psihološki** čimbenici u određenoj se mjeri nadovezuju na moralne. Ljudi imaju tendenciju dosljednosti u svom ponašanju. Ako osoba odluči smanjiti potrošnju energije, mogla bi sebe doživljavati kao zagovornika okoliša i, kako bi zadržala tu percepciju, mogla bi proširiti svoje djelovanje u pogledu zaštite okoliša. Iz ove perspektive, svako pro-ekološko ponašanje olakšava druga ponašanja za okoliš. Čak i ponašanja koja nisu racionalna s ekonomskog stajališta ili koja sama po sebi nemaju značajne posljedice mogu biti vrlo važna jer otvaraju put daljnjem uključivanju u ekološki odgovorna ponašanja. S druge strane, izbor za uštedu energije, tako da se čovjek osjeća dobro u sebi, mogao bi ga ponekad potaknuti da se prepusti drugim aktivnostima koje zahtijevaju veliku potrošnju energije. Na primjer, kupnja automobila s hibridnim motorom mogla bi rezultirati osjećajem da je osoba posvetila dovoljno napora za uštedu energije i potaknuti je da vozi više nego što bi inače. Takozvana pristranost pojedinačnog djelovanja javlja se kada se osoba posveti samo jednom nastojanju za zaštitu okoliša i smatra ga dovoljnim [7].

Kriteriji objektivne evaluacije nisu tako učestali kako se možda na prvi pogled čini, stoga pojedinci često koriste socijalnu usporedbu kako bi došli do odgovarajuće procjene. Društveno odobrenje i društveno priznanje traži se radi njih samih, a ne zbog bilo kakve buduće koristi koju bi mogli donijeti. Na taj način **društveni** čimbenici pokreću individualno ponašanje – ljudi se ponašaju na način koji je društveno prihvatljiv i izbjegavaju ponašanja koja vode do neodobravanja. S obzirom na važnost interakcije između pružatelja usluge i kupca, vjerodostojnost i razina povjerenja važni su čimbenici.

Kupci, odnosno potrošači energije, s pružateljem usluge trebaju dijeliti velik broj osobnih podataka. Niska razina povjerenja u pružatelja usluge stoga može predstavljati značajnu prepreku pri ugradnji sustava upravljanja energijom. Nadalje, želja za autonomijom, kontrolom, privatnošću, udobnošću i sl., često nadvladava moguće koristi od sustava upravljanja energijom kao što su financijske uštede te očuvanje okoliša i energije.

Potrošači mogu biti nevoljni promijeniti ponašanje, čak i ako to ima jasne koristi. Nevoljkost sudjelovanja u upravljanju energijom često se javlja i zbog manjka motivacije za implementiranjem upravljanja energijom u trenutačne živote, odnosno životne stilove.

Zbog toga se na inertnost nadovezuje ograničena racionalnost, odnosno situacija u kojoj kupac, ni sa svim potrebnim informacijama, ne donosi optimalnu odluku. U praksi, ljudi nisu



potpuno informirani o mogućnostima uporabe i uštede energije, kao i o tome što se, na primjer, događa ukoliko ne recikliraju. Međutim, često ni ta „dodatna“ informiranost nije dovoljna kako bi se kućanstva potaklo na učinkovitiju potrošnju energije. Učinkovitija potrošnja energije ponekad može značiti jednokratni trošak (npr. u smislu nabave kućanskog aparata koji učinkovitije troši energiju), no u budućnosti će kućanstva imati energetske i cjenovne uštede koje nadmašuju taj trošak. Da je čovjekovo ekonomsko i tržišno djelovanje uvijek racionalno, svatko bi se odlučio na tu opciju, što pak u praksi nije ni izbliza slučaj. Ograničena racionalnost može se očitovati i manjkom motivacije za ugradnju sustava upravljanja energijom zbog toga što kupac smatra da već poduzima dovoljno toga po pitanju uštede energije i povećanja energetske učinkovitosti. Drugim riječima, iako bi sustav upravljanja energijom donio dodatne prednosti, kupac se zadovoljava trenutnim stanjem, odnosno, „dovoljno dobrom“ opcijom. [10]

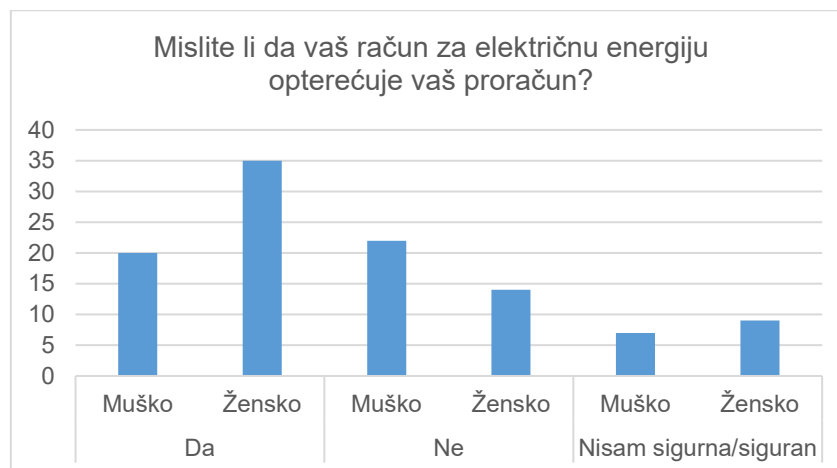
Navedene i druge prepreke mogu se na određene načine umanjiti ili u potpunosti ukloniti. Na primjer, prepreke koje uključuju rizik i neizvjesnost, ograničenja u učenju i usvajanju novih znanja, društvene norme i sl., mogu se umanjiti pružanjem više informacija. Veća količina adekvatnih informacija povećat će svijest o važnosti štednje energije i njeno transparentnije korištenje. Na takvim bi saznanjima trebale biti kreirane i okolišne politike koje za cilj imaju poticati učinkovitu potrošnju energije. Što je kod potrošača prisutno manje prepreka, to će motivacija za ugradnju sustava upravljanja energijom biti veća.

Istraživanja su utvrdila kako u nekim slučajevima i imidž može biti važan društveni čimbenik koji utječe na motivaciju ugradnje sustava za upravljanje energijom. Ovaj se društveni čimbenik nadovezuje na društvene norme. Na primjer, percipirane društvene (subjektivne) norme definiraju se kao očekivanja osobe koja se odnose na društvenu prihvatljivost uključivanja (ili nesudjelovanja) u određenom ponašanju. Često se tvrdi da usvajanje i korištenje nove tehnologije uključuje razmatranje načina na koji će nečije usvajanje tehnologije promatrati druge osobe (npr. prijatelji, rođaci, kolege). S tim u vezi, s obzirom na imidž, odnosno očekivano poboljšanje društvenog položaja osobe u njihovim društvenim skupinama, utvrđen je utjecaj na prihvaćanje i korištenje tehnologije u nekim okolnostima. Norme i imidž najčešće nisu glavni motivatori, međutim, važni su dodatni motivatori, odnosno prediktori prihvaćanja novih tehnologija [11].

### **3. Istraživanje motiviranosti za ugradnju sustava upravljanja energijom među kupcima električne energije**

Istraživanje motiviranosti za ugradnju sustava upravljanja energijom među kupcima električne energije provedeno je u razdoblju 4.5.2022. do 12.6.2022. Putem Google obrasca kreiran je anketni upitnik u kojem su ispitanici dobrovoljno i anonimno odgovarali na pitanja. U njemu je ukupno sudjelovalo 107 ispitanika. Anketa nije ciljano poslana točno određenom broju ispitanika u pojedinoj dobnoj kategoriji. Ispitanici su prvo upitani za svoju dob, koja je u rasponu od 18 do 66 godina. Najveći broj ispitanika, njih 74, u dobi je 18-32 godine. U drugom pitanju ispitanici su trebali navesti spol. Većina ispitanika, njih 58, ženskog je spola, dok je 49 ispitanika muškog spola. Zbog ograničenošću prostorom u ovom radu, u nastavku slijede rezultati za odabrana pitanja koja su relevantna za temu ovog rada.

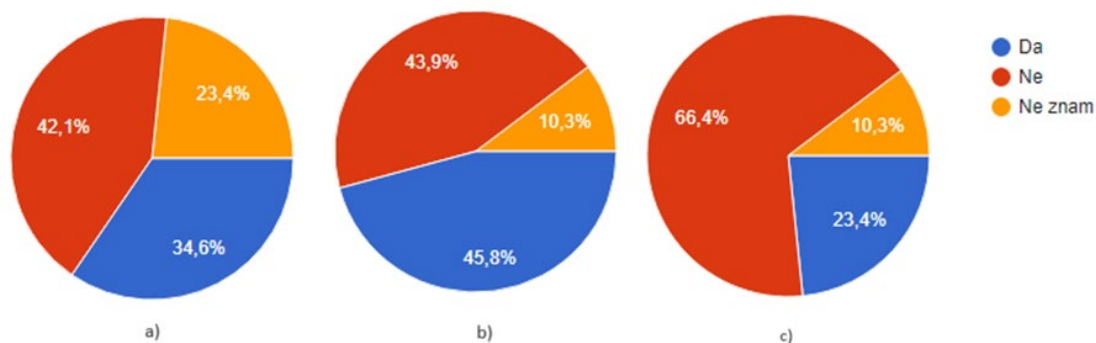
Na pitanje smatraju li da račun za električnu energiju opterećuje njihov kućni proračun, nešto više od polovice ispitanika, njih 55, smatra da računi za električnu energiju opterećuju njihov proračun (slika 1).



**Slika 1.** Rezultati odgovora na anketno pitanje o utjecaju računa za električnu energiju na kućni proračun

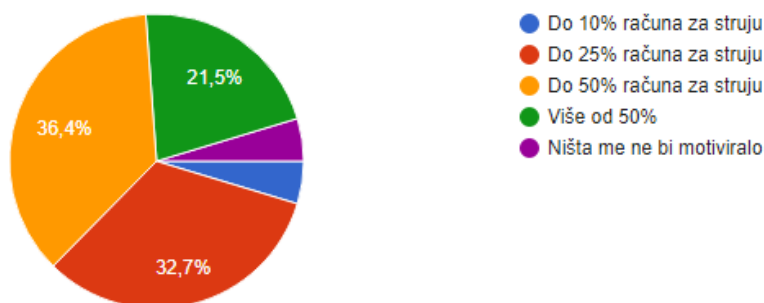
U sljedećem se pitanju od ispitanika tražilo da procijene ukupnu mjesečnu potrošnju električne energije. Zanimljivo je da čak 55 ispitanika, tj. nešto više od polovice ispitanika, ne može iznijeti procjenu. Slijedi 17 ispitanika koji smatraju kako troše između 200 i 300 kWh mjesečno, potom 15 koji smatraju da troše između 100 i 200 kWh, 12 koji smatraju da troše više od 300 kWh te 7 koji smatraju da troše do 100 kWh.

U sljedećem pitanju ispitanici su trebali navesti pokušavaju li aktivno smanjiti potrošnju električne energije i račune za istu. 45 ispitanika odgovorilo je potvrdno, uz to, još 46 ispitanika izjavilo je da ponekad pokušavaju aktivno smanjiti potrošnju električne energije, dok je samo 16 ispitanika odgovorilo negativno. Slijedila su konkretnija pitanja koje su uređaje spremni ponuditi u odgovor potražnje (slika 2).



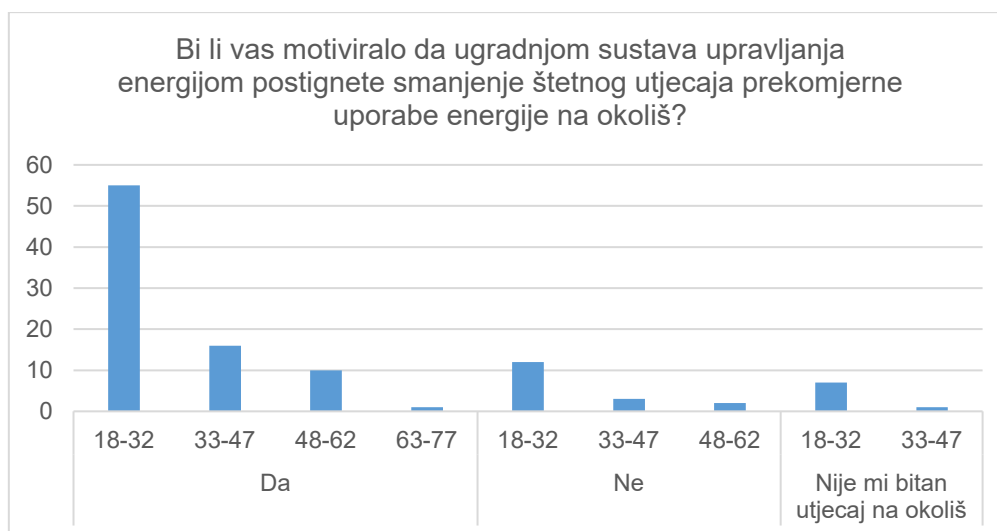
**Slika 2.** Odgovori na pitanja koliko su ispitanici spremni na odgodu korištenja pojedinih aparata na zahtjev opskrbljivača: a) hladnjak, b) perilica posuđa/rublja, c) uređaj za kuhanje

Nakon toga, slijedila su pitanja u vezi motiviranosti za ugradnju sustava za upravljanje energijom (slike 3 do 9).



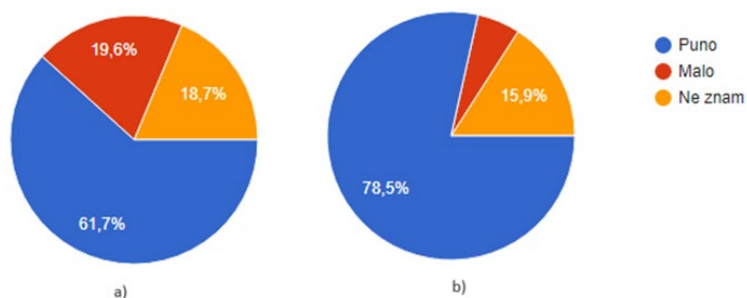
**Slika 3.** Rezultati odgovora na anketno pitanje o visini uštede na računima za električnu energiju koja bi ispitanike motivirala na ugradnju sustava za upravljanje energijom

Ako se pogledaju rezultati odgovora ispitanika vezanih za očekivanu uštedu zbog ugradnje sustava za upravljanje energijom (slika 3), samo 5 ispitanika (4,6%) osjećalo bi se motivirano uštedom do 10%. Većina ispitanika očekuje veće uštede na računu za električnu energiju ako bi ugradili sustav za upravljanje električnom energijom. Uštede od 50% na računu za energiju vrlo vjerojatno nisu ostvarive te se ovdje pokazuje važnost ostalih čimbenika motivacije ugradnje sustava za upravljanje energijom.

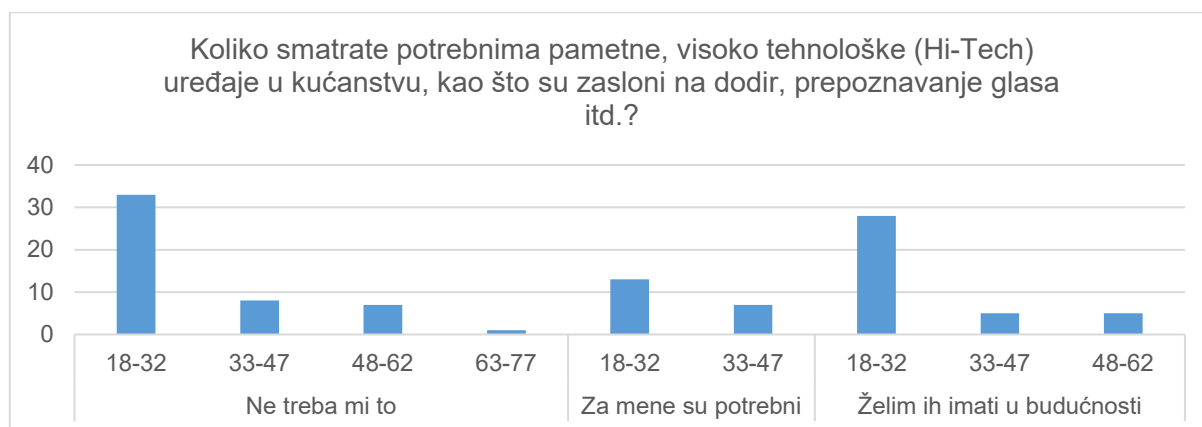


**Slika 4.** Rezultati odgovora na anketno pitanje o ovisnosti smanjenja štetnog utjecaja na okoliš kao motivirajući čimbenik, analiza prema dobnim skupinama

Analiza odgovora na slici 4 pokazuje da su ispitanici u svim dobnim skupinama u većem broju odgovorili kako bi bili motivirani smanjenjem štetnog utjecaja na okoliš. Također, značajno više od polovice ispitanika smatra bitnim jednostavnost upotrebe i lako održavanje sustava te besplatnu i brzu tehničku podršku (slika 5).

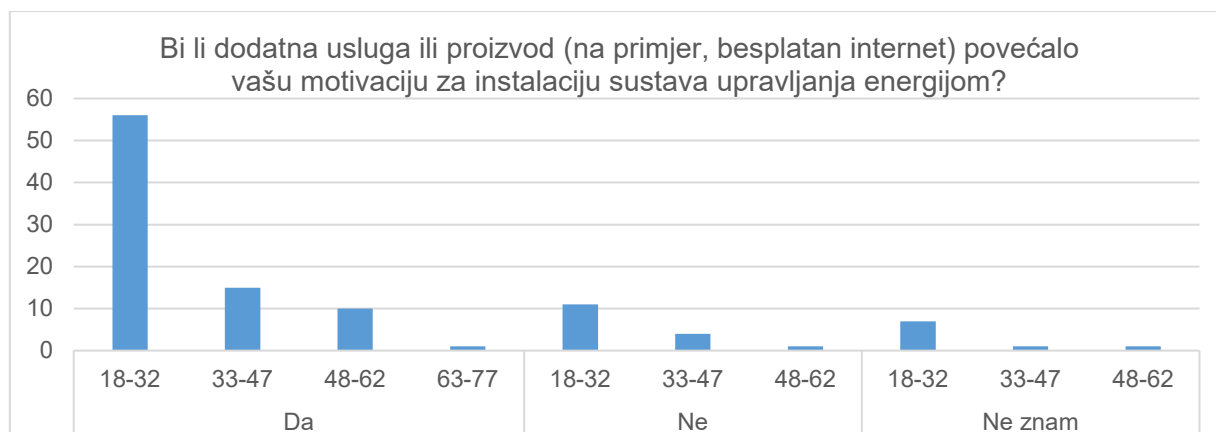


**Slika 5.** Odgovori ispitanika na pitanje bi li ih za instaliranje sustava upravljanja potrošnjom motivirala: a) jednostavna upotreba i lako održavanje, b) besplatna i brza tehnička podrška

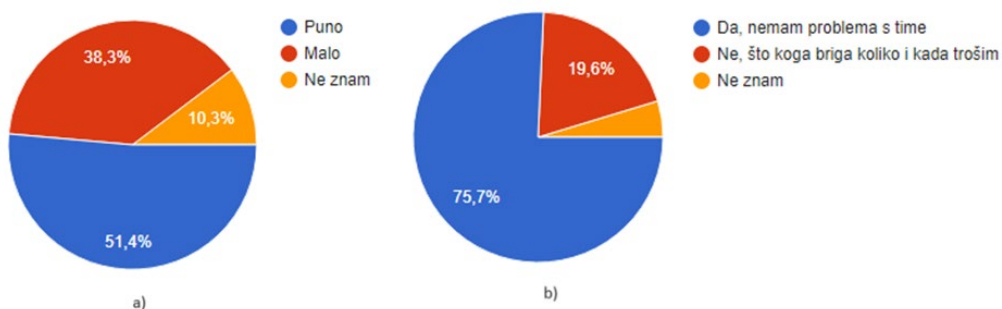


**Slika 6.** Rezultati odgovora na anketno pitanje o mišljenju ispitanika o potrebnosti visokotehnoloških uređaja, analiza prema dobnim skupinama

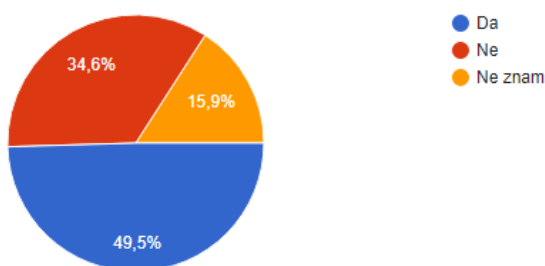
Najveći broj ispitanika, njih 49 izjavio je kako im visokotehnološki uređaji nisu potrebni (slika 6). Za 20 ispitanika takvi uređaji su potrebni. Pridodamo li njima i 38 ispitanika koji su izjavili kako takve uređaje želi imati u budućnosti, može se reći kako je i ovo značajan motiv za ugradnju sustava upravljanja potrošnjom energije. Velik broj ispitanika, njih 82, imalo bi povećanu motivaciju za ugradnju sustava upravljanja energijom kada bi uz sam sustav dobili i neki dodatni proizvod ili uslugu (slika 7).



**Slika 7.** Rezultati odgovora na anketno pitanje o utjecaju dodatnih proizvoda i usluga na motivaciju ugradnje sustava upravljanja



**Slika 8.** Odgovori ispitanika na pitanje: a) Koliko bi im značilo da mogu predvidjeti i analizirati svoju potrošnju? b) Bi li dozvolili praćenje i analizu potrošnje kućanstva u svakom trenutku od strane opskrbljivača?



**Slika 9.** Odgovori ispitanika na pitanje bi li se odmah pohvalili svojim prijateljima i rodbini novim, pametnim rješenjima u kući

Malo više od polovice ispitanika izjavilo je da bi im bila značajna mogućnost analize vlastite potrošnje električne energije (slika 8a). Ova mogućnost može se pripisati i društvenom motivacijskom čimbeniku jer bi predviđanjem, praćenjem i analizom vlastite potrošnje ispitanici istu mogli uspoređivati sa drugima te bi tako mogli saznati svoj položaj u društvu te kako se uklapaju u društvene norme. Čak 81 ispitanik ne bi imao problem s dopuštanjem praćenja i kontrole potrošnje električne energije u bilo kojem trenutku od strane opskrbljivača (slika 8b). Nešto manje od polovice ispitanika izjavilo je kako bi se odmah pohvalilo prijateljima i rodbini kako su ugradili sustav za upravljanje energijom (slika 9). Za te je ispitanike ovaj društveni čimbenik važan motiv ugradnje sustava upravljanja energijom.

#### 4. Zaključak

Kako bi se korisnici odlučili na ugradnju sustava za upravljanje energijom, moraju imati visoku motivaciju jer takvi sustavi podrazumijevaju ulaganja koja će se tek u budućnosti isplatiti. Postoje različite skupine čimbenika motivacije, a u svrhu ovog rada izdvojeni su ekonomski, moralni/okolišni, psihološki i društveni. Potrošači su najviše motivirani na ugradnju sustava zbog ušteta koje će ostvariti na računima u budućnosti. Međutim, za isplativost putem ušteta treba proći puno vremena, dok istovremeno sustavi mogu zahtijevati značajna početna ulaganja. Suvremena istraživanja stoga sugeriraju kako ekonomski čimbenici motivacije sami po sebi nisu dovoljni. Rezultati istraživanja koje je predstavljeno u ovom radu pokazuju kako bi veći dio ispitanika, njih 63,6% pristalo na automatsko upravljanje električnim uređajima bez narušavanja kvalitete živote. Davanje osobnih podataka te dopuštanje praćenja i kontrole potrošnje energije ne bi predstavljalo

problem za 75,7% ispitanika. Smanjenje štetnog utjecaja na okoliš smatra čak 76,6% ispitanika kao značajan motivirajući čimbenik. Također, značajno više od polovice ispitanika smatra bitnim jednostavnost upotrebe te besplatnu i brzu tehničku podršku. Gotovo polovica ispitanika izjavila je kako bi se svojim sustavom odmah pohvalila osobama iz njihovih društvenih grupa. Imajući na umu sve odgovore ispitanike, može se zaključiti kako za većinu ispitanika ekonomski čimbenik ima najznačajniji utjecaj, međutim, društveni i moralni/okolišni čimbenici također predstavljaju značajni motiv za ugradnju sustava za upravljanje energijom.



Ovaj rad izrađen je u sklopu projekta Hrvatske zaklade za znanost „Distribucijska elektroenergetska mreža s velikim udjelom aktivnih kupaca“ (broj projekta: UIP-2020-02-5796).

## 5. Literatura

- [1] Barbero, M.; Corchero, C.; Casals, L.C.; Igualada, L.; Heredia, F.J. Critical evaluation of European balancing markets to enable the participation of Demand Aggregators. *Appl. Energy* 2020, 264, 114707.
- [2] Šarganović, H. Bihevioralna ekonomija i psihologija ekonomskog ponašanja i odlučivanja potrošača na tržištu. dostupno na: <https://www.ceps.edu.ba/Files/DIT/Godina%205%20Broj%202/10.pdf?ver=1> [pristupljeno: 05.06.2024.]
- [3] Beckenbach, F.; Kahlenborn, W. *New Perspectives for Environmental Policies Through Behavioral Economics*. Springer, London, 2016.
- [4] Jelić, N. Bihevioralna ekonomija, neuroekonomija, neuromarketing. *European Journal of Bioethics* 6 (9), 2014., str. 193-209
- [5] European Environment Agency, *Achieving energy efficiency through behaviour change: what does it take?* EEA Technical Report (5), 2013.
- [6] Bejaković, P. Prikaz knjige: Darko Polšek i Kosta Bovan (ur.): *Uvod u bihevioralnu ekonomiju*. *Političke analize*, 6 (21), 2015., str. 55-57.
- [7] Nowak, A.; Rychwalska, A. Social, Psychological and Technological Determinants of Energy Use. *IEEE Technology and Society Magazine* 33(3), str. 42-47.
- [8] Ambrinac, F. Društveni čimbenici motivacije ugradnje sustava upravljanja energijom. diplomski rad, FERIT Osijek, 2022.
- [9] Park, E.S.; Hwang, B.Y.; Ko, K.; Kim, D. Consumer Acceptance Analysis of the Home Energy Management System. *Sustainability* 9 (12), 2017., str. 1-15.
- [10] Good, N.; Ellis, K.A.; Mancarella, P. Review and Classification of Barriers and Enablers of Demand Response in the Smart Grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, 2017.
- [11] Whittle, C.; Jones, C.R.; While, A. Empowering householders: Identifying predictors of intentions to use a home energy management system in the United Kingdom, <https://eprints.whiterose.ac.uk/158011/1/Empowering%20householders%20manuscript%20-%20post-print.pdf> [pristupljeno: 12.06.2024.]



# Opportunities and Limitations in the Utilization of Hydrogen for Combustion Purposes

Gy. Vasvári<sup>1,\*</sup>, B. Kurilla<sup>1</sup>, J. Vajda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology,  
University of Pécs, Hungary

\* Corresponding Author. E-mail: [vasvari.gyula@mik.pte.hu](mailto:vasvari.gyula@mik.pte.hu)

## Abstract

Hydrogen is increasingly recognized as a potential clean energy carrier due to its high energy density and zero-emission combustion products. This paper explores the opportunities and limitations associated with using hydrogen for combustion, drawing from recent research and industrial practices. Key areas of focus include the properties of hydrogen, its integration into existing gas distribution networks and the comparative efficiency of hydrogen heating systems versus heat pump systems. The findings are supported by experimental data and case studies, particularly from the 'German Technical and Scientific Association for Gas and Water (DVGW)' research project on hydrogen integration into natural gas networks.

**Keywords:** hydrogen utilization, green hydrogen, combustion, gas system components, renewable energy integration

## 1. Introduction

The utilization of hydrogen as a fuel presents a significant opportunity for reducing greenhouse gas emissions. Hydrogen's combustion results in water vapor, making it an attractive alternative to fossil fuels. However, there are technical and economic challenges to its widespread adoption. This paper aims to provide a comprehensive overview of these opportunities and limitations, particularly in the context of Hungary's energy landscape.

## 2. Properties of Hydrogen

Hydrogen boasts several properties that make it an appealing fuel:

- **Abundant Availability:** Hydrogen can be produced from water, a mostly limitless resource.
- **Multiple Production Methods:** Industrial-scale production methods include electrolysis and natural gas reforming.
- **Clean Combustion:** The primary combustion product is water, eliminating CO<sub>2</sub> emissions.
- **High Energy Density:** With an energy density of 39 kWh/kg, hydrogen surpasses traditional fuels like methane.

- Explosive Range: Hydrogen has a wide explosive concentration range (4-77%), posing safety considerations.
- High Flame Temperature: The flame temperature with air reaches 2045°C, higher than that of methane.
- Versatility: Hydrogen can be used directly in fuel cells for electricity generation or blended with natural gas

### 3. Research and Development

#### 3.1. DVGW Project on Hydrogen Blending

The DVGW (in German: Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches) research project investigates the effects of blending hydrogen into natural gas distribution networks [1].

Key findings include:

- Hydrogen concentrations up to 10% by volume can be safely blended with natural gas without adverse effects on household appliances.
- CO emissions tend to decrease with hydrogen blending.
- Mechanical properties of pipeline materials can be affected by hydrogen, necessitating material compatibility assessments.

**Table 1.** Operational tests on hydrogen injection [1]

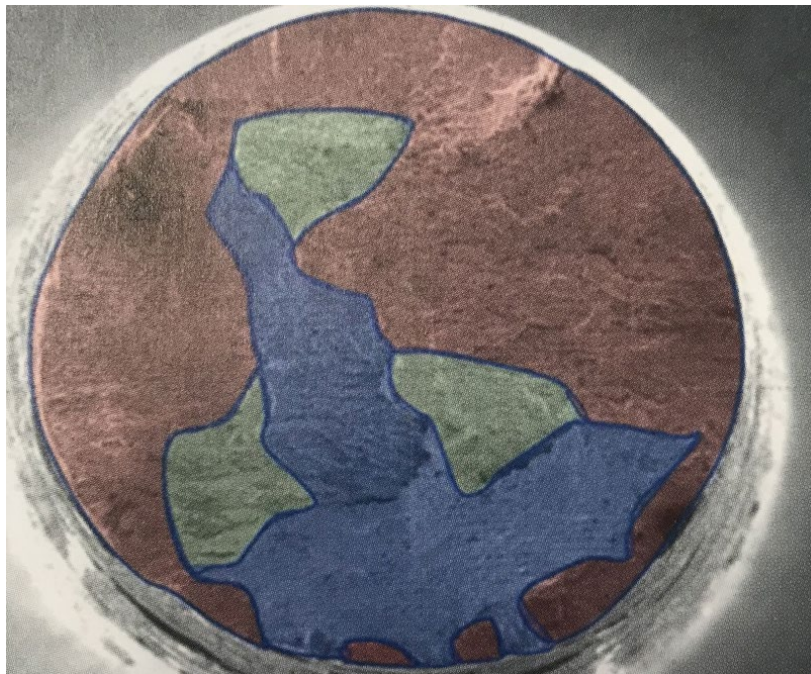
<b>Total Installed Gas Appliances</b>	<b>174</b>
Condensing Boiler	139
Flow Water Heater	18
Gas Stoves and Kitchen Appliances	9
Block Burner Appliances	4
Combined Heat and Power Appliances	1
Other Appliances	3
<b>Duration of Hydrogen Injection</b>	<b>2683 h</b>
Alternating 2%, 3%, and 4% by Volume	433 h
Continuously at 4% by Volume	427 h
Continuously at 6.5% by Volume	988 h
Continuously at 9% by Volume	835 h
<b>Number of Measurements on Installed Appliances</b>	<b>422</b>
Number of Measurements with CO <sub>2</sub> > 500 ppm	9
Measurements with CO <sub>2</sub> > 500 ppm	2.10%



### 3.2. Material Compatibility

The introduction of hydrogen into steel and plastic pipelines reveals varying impacts:

- **Steel Pipelines:** Hydrogen can cause microcracking and embrittlement, especially under cyclic loading conditions. The introduction of hydrogen into steel pipelines requires special attention, as hydrogen atoms can integrate into the crystal structure of the steel, causing micro-level cracks and embrittlement. Cyclic loading further accelerates the growth of these cracks. Therefore, it is crucial that the materials used for the pipes are suitable for transporting hydrogen.
- **API 5L Grade L360** is a standard specification for the dimensions, material, and technical delivery conditions of seamless and welded steel pipes, mainly used for pipelines. These steel pipes are designed for pipeline transportation systems in the petroleum and natural gas industries. API 5L is suitable for conveying gas, water, and oil. The standard ensures that steel pipes possess the appropriate mechanical properties and dimensional tolerances to be reliable over the long term in pipeline applications, particularly those prepared for hydrogen transport [2]. The surfaces shown in the Figure 1 are:
  - Brown: brittle fracture surface
  - Blue: ductile (fatigue, plastic) fracture surface
  - Green: mixed fracture surface



**Figure 1.** Fracture surface of a test specimen made from L360 material [7]

- **Plastic Pipelines:** The diffusion of hydrogen into plastic pipe materials negligibly affects the mechanical properties of the pipes. Aging of hydrogen-carrying pipelines

does not influence the changes in the crystal structure significantly. Pipes made from PE80, PE100, PE100-RC, and PA-U12 structural materials are suitable for hydrogen transport. Research indicates that the amount of permeating gas depends on the gas composition (density and viscosity). The permeated gas volume remains comparable to that measured with pure methane up to a hydrogen content of 30% by volume, but increases significantly beyond this point [8].

- Studies show that PE80 and PE100 pipes maintain their integrity and mechanical properties even after long-term exposure to hydrogen. For example, the PE100-RC material demonstrates enhanced resistance to slow crack growth (SCG), making it particularly suitable for harsher installation conditions, such as trenchless laying and open trench installations without a sand bed. This results in considerable time and cost savings, often covering the additional cost of PE100-RC pipes. These findings, supported by numerous international field tests and studies, confirm that plastic pipes made from these materials are reliable for hydrogen transport under various conditions.



**Figure 2.** Installation of PE pipes [8]

When selecting plastic pipes for hydrogen transport, using materials like PE80 and PE100 is particularly advantageous. The designations PE80 and PE100 are based on the long-term strength of the respective materials, known as the Minimum Required Strength (MRS) according to ISO 12162. The minimum required strength for PE80 material is 8.0 MPa, while for PE100 and PE100-RC materials, it is 10.0 MPa. The MRS is determined by performing regression analysis on the test data from long-term pressure testing, allowing for the prediction of minimum strength over a specified service lifetime. The data is extrapolated to predict the minimum strength at 20°C and the specified 50-year design lifetime [3-5].

PE100-RC is a variant of PE100 that has higher resistance to slow crack growth (SCG) than conventional PE100. RC stands for Resistant to Cracking, indicating that it better resists crack formation. According to ISO 13479, PE100-RC must perform for at least 8760 hours in the notched pipe test, compared to the 500-hour requirement for conventional PE100. PE100-RC pipes can be installed under harsher conditions than conventional PE100 pipes, including trenchless laying using directional drilling and open trench installations without a sand bed. These methods can result in significant time and cost savings, with total installation cost reductions of around 20-50% [3-5].

The necessary level of slow crack growth resistance in PE100-RC pipes is ensured through extensive testing, as specified in standards such as ISO 18488, ISO 18489, and ISO 13479. These standards ensure that PE100-RC pipes meet the required performance criteria for environmental stress crack resistance and slow crack growth under cyclic loading [3-5].

#### 4. Hydrogen Production Methods

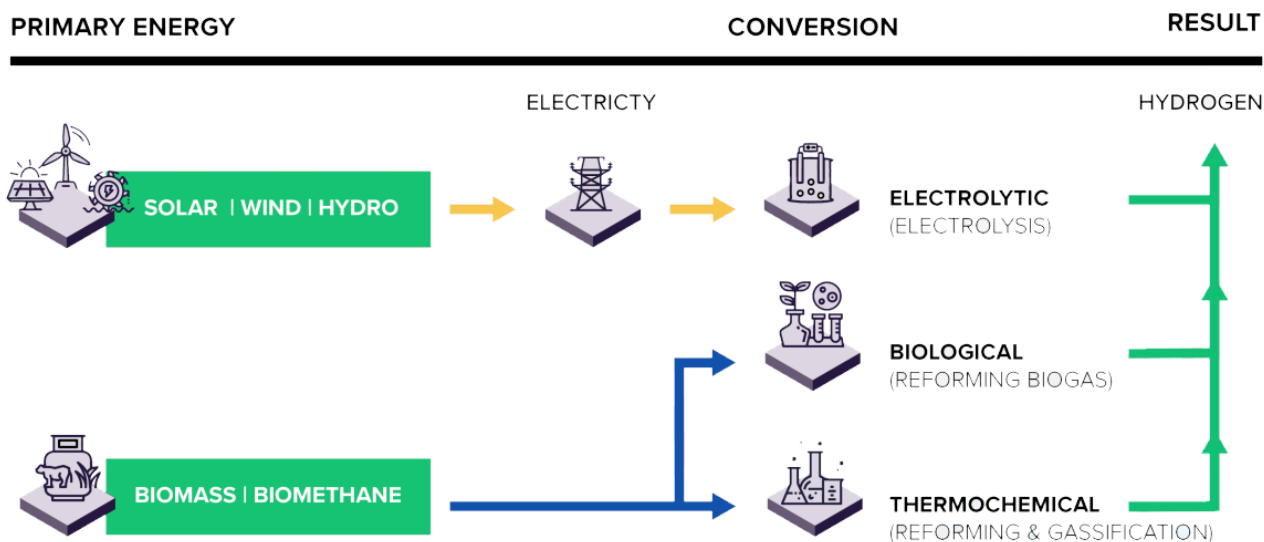
Hydrogen can be produced through several methods, each with varying environmental impacts:

- Steam Methane Reforming (SMR): Produces hydrogen from natural gas with CO<sub>2</sub> as a byproduct.
- Electrolysis: Uses electricity to split water into hydrogen and oxygen, ideally powered by renewable energy sources.
- Methanol Reforming: Similar to SMR, but uses methanol as the feedstock.

**Table 2.** Hydrogen Production Methods: Energy Demand and Cost [9]

Method	Energy Demand (kWh/Nm <sup>3</sup> )	Cost (Ft/Nm <sup>3</sup> )
Natural Gas Reforming	0.05	45
Methanol Reforming	0.05	78
Electrolysis	4.51	110

Different methods of hydrogen production have varying environmental impacts and costs. One of the most environmentally friendly methods is the production of green hydrogen, which is generated by electrolysis using 100% renewable energy sources [10]. During electrolysis, water is split into hydrogen and oxygen using electrical energy, producing no harmful by-products. This method is particularly crucial for achieving a climate-neutral future, as green hydrogen production is entirely clean and helps reduce carbon dioxide emissions [11]. As Lin et al. [12] shown in their study, green hydrogen can be produced from biomass and biomethane(see Fig.3).



**Figure 3.** Methods for producing Green Hydrogen [12]

Grey hydrogen is produced by reforming natural gas, during which the resulting carbon dioxide is released into the atmosphere. This method is less environmentally friendly as it results in significant CO<sub>2</sub> emissions and is currently the most common method of hydrogen production [13-14].

Blue hydrogen is also produced through the reforming of natural gas, but in this case, the resulting carbon dioxide is not released into the atmosphere. Instead, it is captured and stored. This reduces the environmental impact, although the production process still relies on fossil fuels. Blue hydrogen thus serves as a transitional solution on the path to fully clean energy [11].

The economic and environmental considerations of these different production methods fundamentally determine hydrogen's role in future energy systems. While green hydrogen represents the most sustainable solution, grey and blue hydrogen are important transitional steps away from fossil fuels [15].



## 5. Case Studies and Practical Applications

### 5.1. Electrolysers

Hydrogen production via water electrolysis is one of the most promising methods, particularly when powered by renewable energy sources. The efficiency and cost of electrolysers are critical factors influencing the feasibility of hydrogen as a mainstream energy source.

The Enapter EL 4.0 electrolyser (see Fig. 4) is a good example of an application that is already available and affordable. This electrolyser is designed to be scalable and modular, allowing for quick installation and low maintenance requirements [16].

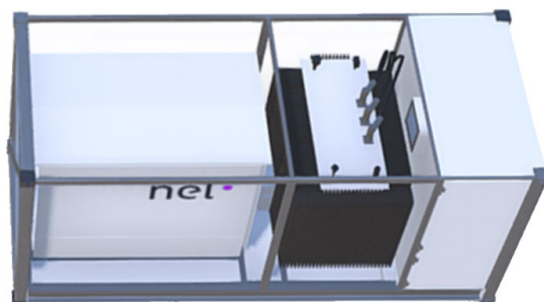


**Figure 4.** Enapter AEM Electrolyser EL 4.0 [16]

Properties of Enapter EL 4.0 Anion Exchange Membrane Electrolyser [16]

- Hydrogen Production: Up to 500 liters per hour
- Dimensions: 0.482 x 0.635 x 0.266 meters, 42 kg
- Output Pressure: Max 35 bar
- Purity: 99.9% (or >99.999% with optional dryer)
- Power Requirement: 24 kW
- Energy Consumption: 4.8 kWh/Nm<sup>3</sup>
- Price: €8,000

PEM (Polymer Electrolyte Membrane) electrolysers also offer good opportunities. The NEL PEM Electrolysers are renowned for their efficiency and scalability, making them ideal for a variety of industrial applications. The M Series of PEM electrolysers, for instance, can produce between 1,698 and 4,920 Nm<sup>3</sup>/h of hydrogen gas with a purity of 99.99995%. These electrolysers are designed for fast response times and high production flexibility, which is particularly beneficial when using renewable power sources. Additionally, the containerized solutions offered by NEL enable flexible siting and minimal maintenance requirements, making them a robust choice for hydrogen production on-demand [17].



**Figure 4.** NEL PEM Electrolyser [17]

## 5.2. Hydrogen Distribution and Consumption Infrastructure

### 5.2.1 Certified Components

Implementing hydrogen in existing gas infrastructure requires certified components to ensure safety and efficiency [6,18].

Key elements include:

- Press Fittings: For copper and steel pipes (Profipress G, Megapress G)
- Ball Valves and Tapping Fittings: For PE-HD pipes
- Compliance Certificates: Sanpress Inox G press system certified for 100% hydrogen content [19].

### 5.2.2 Pressure Regulators and Gas Meters

Hydrogen-compatible pressure regulators and gas meters are essential for accurate measurement and safe operation. Advances in microthermal measurement principles have demonstrated reliable performance with small relative measurement errors at various hydrogen concentrations (5%, 10%, 23%, and 100%) [6,18].

## 5.3. Combustion Applications: Gas Boilers and Furnaces

Hydrogen can be blended with natural gas in existing boilers and furnaces to reduce carbon emissions. Leicher et al. [18] conducted extensive research on household heating devices, which confirmed that it is beneficial to blend hydrogen with natural gas for heating purposes. Some modern boilers allow for up to 20% hydrogen blending:

- Weishaupt WTC-GB 470-A and 620-A: Allows 20% hydrogen content [19]
- Viessmann Vitodens 100-W and 111-W: Allows 20% hydrogen content [20]

For purely hydrogen-fired boilers, companies like Remeha have developed systems that are thoroughly tested for safety and efficiency. These hydrogen boilers, such as those used in the Uithoorn project [21], have proven their reliability and leak-tightness in real-world conditions.





**Figure 5.** Hydrogen heating boiler integrated into the heating system of an office building [22]

#### 5.4. Renewable Energy and Hydrogen Production in Hungary

As of September 2022, Hungary's renewable electricity capacity was 2591 MW, capable of producing approximately 2720 GWh/year. Using proton exchange membrane (PEM) electrolyzers with specific energy requirements (55-58 kWh/kg), this capacity could produce around 49,000 tonnes of hydrogen annually. This amount could replace about 1.9% of Hungary's natural gas consumption in 2021 [23].

**Table 3.** The renewable electricity capacity existing in Hungary in September 2022 [24]

Energy Source	Installed Capacity (MW)
Biogas	71.654
Biomass	108.140
Water	48.186
Wind	327.250
Solar	2021.322
Geothermal Energy	2.700
Landfill Gas	11.555
Total	2590.807



## 5.5. Economic and Efficiency Considerations

The economic viability and efficiency of hydrogen heating compared to other technologies is a critical aspect of the energy transition. Hydrogen, while promising as a clean fuel, faces significant challenges in terms of production cost and energy efficiency.

### 5.5.1. Energy Efficiency Comparison

A major consideration is the comparative energy efficiency of hydrogen heating versus heat pumps. According to data from various studies, heat pumps are substantially more efficient. Specifically:

- Heat Pumps: 1 kWh of electricity can produce 3 kWh of heat energy.
- Hydrogen Heating: 2 kWh of electricity is required to produce 1 kWh of heat energy [25].

This means that hydrogen heating requires six times more renewable energy capacity than electric heat pumps to produce the same amount of heat [23]. This stark difference underscores the inefficiency of hydrogen heating in comparison, especially when renewable energy resources are limited [25].

### 5.5.2. Economic Costs

The costs associated with hydrogen production, storage, and distribution also play a significant role. Producing hydrogen through electrolysis is currently more expensive than direct electricity use in heat pumps. Additionally, the infrastructure required to safely store and transport hydrogen adds to the overall cost [25].

A study highlighted by Gebäude-Energieberater [25] indicates that the high operational costs of hydrogen boilers and the necessary modifications to existing infrastructure make hydrogen heating less economically viable in the near term. Investments in hydrogen-ready boilers and the adaptation of current gas networks for hydrogen use are substantial, and the return on investment may not be immediate [21,25].

## 6. Conclusion

Economic and efficiency considerations reveal that while hydrogen is a promising clean energy source, its current use in heating systems is less viable compared to technologies like heat pumps. Hydrogen heating demands significantly more energy and incurs higher costs due to production, storage, and infrastructure modifications. Although blending hydrogen into natural gas can reduce emissions, transitioning to pure hydrogen systems faces substantial economic and technical barriers. Ongoing research and pilot projects are crucial to overcoming these challenges. Hydrogen's role in future energy systems will likely complement other technologies, such as heat pumps, rather than entirely replace them.

## 7. References

- [1] Dörr, H., et al. (2016). Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz. See [https://www.dvgw-ebi.de/medien/dvgw-ebi/2\\_themen/publikationen/2016-nov-ewp-doerr.pdf](https://www.dvgw-ebi.de/medien/dvgw-ebi/2_themen/publikationen/2016-nov-ewp-doerr.pdf)
- [2] Specification for Line Pipe, API Specification 5L, Forty-Fifth Edition, December 2012, American Petroleum Institute
- [3] ISO 9080:2012 Plastics piping and ducting systems - determination of long term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation.
- [4] EN ISO 12162:2009 Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications - Classification and designation - overall Service (Design) coefficient.
- [5] EN 12201-1:2024 Plastics piping systems for water supply and for drains and sewers under pressure - Polyethylene (PE) - Part 1: General.
- [6] DVGW energie/wasser-praxis. (September 2020)
- [7] Redmann, A. (2021). Einfluss von Wasserstoff auf Kunststoffrohre und Formteile untersucht // Werkstofftechnik.
- [8] Galyas, A. B., Szunyog, I., & Vadász, M. (2022). A földgázfelhasználás hidrogénnel történő helyettesítésének elméleti potenciálja Magyarországon. // ÉPÜLETGÉPÉSZ.
- [9] Szilágyi, Zsombor; Vajda, József. A hidrogén szerepe az energiatárolásban. // Épületgépész X.évfolyam, 2021/1. március
- [10] Deign, J., So, What Exactly Is Green Hydrogen? See <https://www.greentechmedia.com/articles/read/green-hydrogen-explained> (accessed 15 July 2024)
- [11] Marchant, N., Grey, blue, green – why are there so many colours of hydrogen? See <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/> (accessed 15 July 2024)
- [12] Lin, Janice (June 2020). "Beyond Power: Opportunities and Challenges for Green Hydrogen". California Air Resources Board. Green Hydrogen Coalition. See [https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-07/ghc\\_cn\\_fuels\\_infra\\_july2020.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-07/ghc_cn_fuels_infra_july2020.pdf) (accessed 15 July 2024)
- [13] The Royal Society. 2018 Options for producing low-carbon hydrogen at scale. See <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbonenergy-programme/hydrogen-production/> (accessed 10 December 2020).
- [14] The International Energy Agency. Hydrogen See <https://www.iea.org/fuelsand-technologies/hydrogen> (accessed 10 December 2020).
- [15] "The Future of Hydrogen – Analysis". IEA. Archived from the original on 12 December 2019. Retrieved 13 January 2022.
- [16] AEM Electrolyser EL 4: Jumpstart your green hydrogen production <https://www.enapter.com/aem-electrolysers/aem-electrolyser-el-4/> (accessed 15 July 2024)
- [17] Nel Hydrogen Electrolyser <https://nelhydrogen.com/product/m-series-electrolyser/> (accessed 17 April 2024)

- [18] Leicher, Jörg; Schaffert, Johanners; Cigarida, Hristina; Tali, Eren; Burmeister, Frank; Giese, Anne; Albus, Rolf; Görner, Klaus; Carpentier, Stéphane; Milin, Patrick; Schwitzer, Jean. The Impact of Hydrogen Admixture into Natural Gas on Residential and Commercial Gas Appliances // *Energies* 2022, 15(3), 777 (<https://doi.org/10.3390/en15030777>)
- [19] Kompakt kondenzációs technika. Maximális teljesítménnyel. <https://www.weishaupt.hu/termekek/gaz-es-olaj-futesi-rendszerek/weishaupt-thermo-condens-wtc-gb-620-kw> (accessed 17 April 2024)
- [20] Vitodens 100-W/111-W Kondenzációs fali gázkazán <https://www.viessmann.hu/hu/termekek/gazfutes/vitodens-100-w-vitodens-111-w.html> (accessed 17 April 2024)
- [21] Hydrogen homes go live in Uithoorn <https://www.bdrthermeagroup.com/en/stories/hydrogen-homes-go-live-in-uithoorn> (accessed 17 April 2024)
- [22] Hidrogén a jövő fűtéstechnikája <https://kazan.hu/hirek/> (accessed 17 April 2024)
- [23] Gyalyas, Anna Bella; Szunyogh, István; Vadászi, Mariann. A földgázfelhasználás hidrogénnel történő helyettesítésének elméleti potenciálja Magyarországon See <https://epuletgepesz.hu/2023/07/02/foldgazfelhasznalas-hidrogen-helyettesites-magyarorszag/> (accessed 17 April 2024)
- [24] Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal: Villamosenergia-ipari engedélyesek listája 2022. szeptember See <http://www.mekh.hu/villamosenergia-ipari-engedelyesek-listaja> (accessed 9 July 2024)
- [25] Klimafreundlich Heizen: Auf H2 warten lohnt nicht 11.07.2023 See <https://www.geb-info.de/heizungstechnik/klimafreundlich-heizen-auf-h2-warten-lohnt-nicht> (accessed 17 April 2024)

# Analysing the impact of gap formation in tube-fin heat exchangers on longevity: a retrospective simulation study

T. Bitó<sup>1</sup>, Á. Cvenits<sup>1</sup>, G. Loch<sup>2</sup>, L. Budulski<sup>2</sup>, Z. Meiszterics<sup>1</sup>, T. Zsebe<sup>1</sup>,  
Gy. Vasvári<sup>1,\*</sup>, B. Babits<sup>3</sup>, D. Csonka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology,  
University of Pécs, Hungary

<sup>2</sup>Department of Building Services and Building Engineering, Faculty of Engineering and Information  
Technology, University of Pécs, Hungary

<sup>3</sup>CAADEX Ltd. Mindszentgodisa, Hungary

\* Corresponding Author. E-mail: [vasvari.gyula@mik.pte.hu](mailto:vasvari.gyula@mik.pte.hu)

## Abstract

This paper presents an in-depth analysis of the effects of ageing gap formation between tubes and fins in heat exchangers, which is a critical factor influencing their operational longevity and efficiency. Operational stresses, such as thermal cycling and mechanical vibrations, may lead to the development of gaps between the fins and tubes over time, potentially degrading the heat exchanger's performance. To explore this phenomenon, heat exchangers that have been used for at least a decade, were dissected to examine the extent of gap formation and its correlation with usage duration and conditions. Using high-resolution cross-sectional imaging and detailed surface analysis of old heat exchangers, the typical gap sizes that develop in operational environments were quantified. These empirical data were then used to model heat flow using Finite Element Method (FEM) simulations, providing a deeper understanding of how these gaps impact thermal resistance and overall heat exchanger performance.

**Keywords:** heat exchanger, fin, tube, gap, FEM

## 1. Introduction

The air-cooled fin-tube heat exchangers are well-known solutions for the cooling needs of many industries. These heat exchangers are responsible for transferring unwanted heat away from equipment. By reusing the extracted heat or enhancing the efficiency of heat transfer, substantial energy and cost savings can be achieved, while mitigating environmental impact. The efficacy of the heat exchanger is influenced by the quality of contact between the pipes and the fins[1]. During the assembly of the heat exchanger, mechanical expansion of the pipes onto the fin collars is commonly employed to ensure a robust metal-to-metal contact between the components. This method also helps to achieve

adequate contact pressure between the tube and the fins as it increases heat transfer[2]. This contact between the parts can deteriorate with time, this phenomenon is also the subject of our research.

In our previous research[3] various trials were conducted involving the application of different contact materials between the fin and tube, including solders, adhesives, and filler metals. These materials were tested to address and eliminate potential imperfections in the connecting surfaces, aiming to enhance the heat transfer rate, prevent corrosion, and mitigate other undesirable side effects associated with currently employed technologies.

In this study, methodology and results are presented of an investigation into the fin-tube contact quality ageing in a used heat exchanger.

One of the tools used in this study is Finite Element Analysis (FEA) which is a vital computational technique in engineering, used to simulate and analyse complex structures by discretizing them into finite elements. It solves partial differential equations for phenomena such as stress and heat transfer. Enhanced by recent advances in algorithms and computing power, FEA now effectively models nonlinear and multi-physics problems.

## **2. Methodology**

Specimens were meticulously cut from a used heat exchanger to facilitate the examination of cross-sections of the fin-tube interface under a microscope. This allowed for an in-depth analysis of the contact quality and the characterization of the gap between the fin and tube.

### **2.1. Production of specimens**

A large, seemingly intact segment of a used air-cooled heat exchanger was cut. This segment was then positioned within a watertight crucible, which was filled with a liquid two-component epoxy resin and was left to solidify over a period of one week. This was necessary to lock the thin aluminium fins in place, thus further machining would not move them.

Once the epoxy resin had fully cured, multiple smaller specimens were excised from various locations within the segment, ensuring that the required cross-sections of the fin-tube contact could be thoroughly examined following the completion of the procedures.

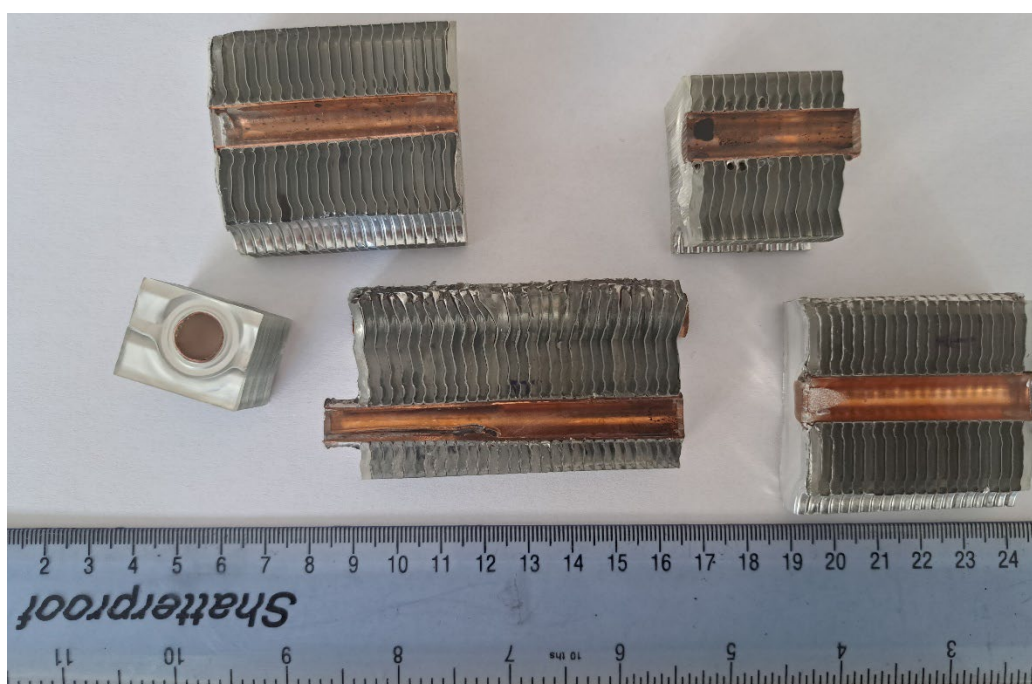
These smaller blocks were then subjected to fine milling to ensure that the cross-section and the opposing, base side surfaces were planar and parallel. This process was essential to achieve a proper surface finish without inducing any deformation of the tube walls and fins to ensure structural integrity for the upcoming delicate measurements.

### **2.2. Preparation**

The desired side of the smaller pieces were then meticulously ground using sandpapers to eliminate any defects or residual debris generated during the preceding operations. The grinding process for such items should always be conducted on a smooth, flat surface; for

this purpose, glass panes were utilized as a base for the sandpapers. The coated abrasive sheets, placed on the glass base were wetted with water.

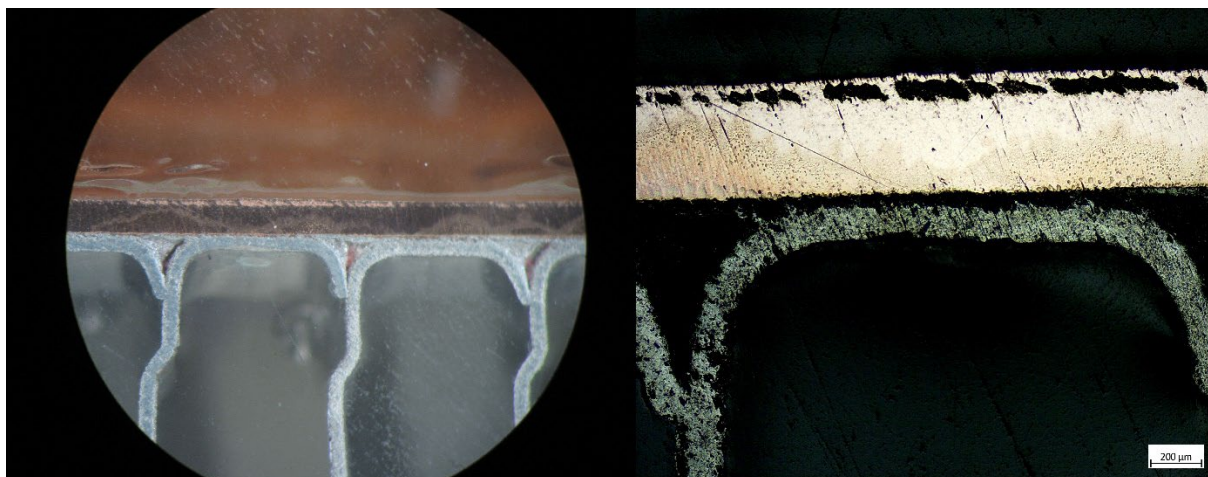
A range of glasspaper grit sizes was employed, starting from 320 and progressing to 3000 with the blocks being rotated 90° between each stage. The specimens were rinsed between each step, and the sandpaper was continuously wetted. Following the grinding, a final polishing process was conducted. The pieces were polished on a rotating felt wheel using aluminium-oxide as abrasive. The samples (Figure 1) were rinsed and dried.



**Figure 1.** Sample of the polished specimens

### 2.3. Microscopy

The workpieces were subjected to detailed examination and imaging using optical microscope. (Figure 2)



**Figure 2.** Optical microscope images of a cross section in the region of the tube-fin contact

Initially, a Zeiss Stemi 2000-C optical microscope was employed to capture high-resolution images of broader geometrical features of the samples. This step provided an overview of the general condition of the cross-sections, allowing for the identification of any visible defects, surface irregularities, or features of interest at a lower magnification. After this, narrower images were taken of the contact zone details with higher magnification using a Zeiss Primotech KMAT optical microscope.

The microscopy provided a comprehensive understanding of the structural attributes of the workpieces, enabling an assessment of the fin-tube contact quality and the overall integrity of the heat exchanger segments. The captured images and acquired data were documented for further analysis and comparison, contributing valuable information to the overall study.

### 2.4. CAD modelling

Imaging was acquired from multiple samples to facilitate an analysis of the fin-tube interfaces, thus creating 11 different models of tube-fin contacts. Each recording was imported into a computer-aided design (CAD) program, where the contours of the tube and fin surfaces were traced to create geometric representations. Gap measurements were performed at 0.05 mm intervals (Figure 3).





**Figure 3.** Gap measurements

The measurement line coordinates were exported in a data file. This process allowed us to consolidate the data and prepare it for further study and comparisons. In this joint file, specific attributes of each filler line, such as length and the x-coordinate of the starting point of the line were extracted and compiled into a structured table.

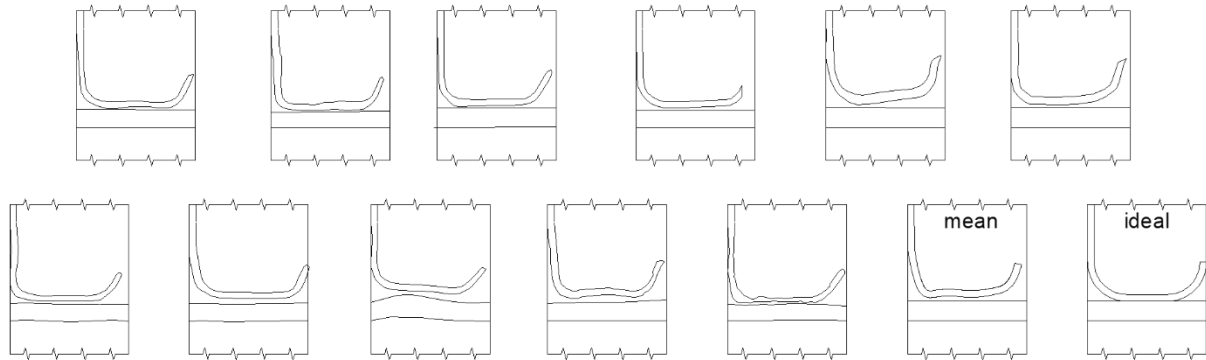
### 2.5. Finite element analysis

Using the 11 models based on the microscopy imaging, finite element analysis was performed using AnSYS 2023 R2 and Fluent. The simulation was steady state, the geometry was simplified by using a 2D axisymmetric model, thus reducing computational time while having the opportunity to use a fine mesh. Thus, the mesh used had 0.1 mm maximum element size with 0.05 mm face sizing for the aluminium fin. The fluid in the copper pipe was 48°C water, flowing with 1.5 m/s at the velocity inlet. The outlet is pressure outlet.

The fin diameter was 200 mm, with only one fin per model. This is not a realistic setup; it was only for the purpose of comparing the tube-fin contact geometries. For this purpose, an idealized model was created, with ideal factory conditions, where there is no gap between the tube and the fin, only at the radius of the fin. The total heat transfer rate results were measured at the realistic contact models and then compared to the results given by the idealistic model. This can give us an idea of how ageing would reduce total heat transfer rate proportionally by tube-fin contact gap increase.

Using the mean gap size curve, an average gap model was created to test a simplified calculation method. It was deemed worthy to inspect whether the total heat transfer rate of

the mean gap size model is significantly close to the mean of the results gained from the 11 inspected models. If this is the case, it means that in further research, it would be enough to perform simulation on the mean gap model instead of performing it separately for every connection. The 11 realistic models, the mean gap size model and the idealized model can be seen on Figure 4.

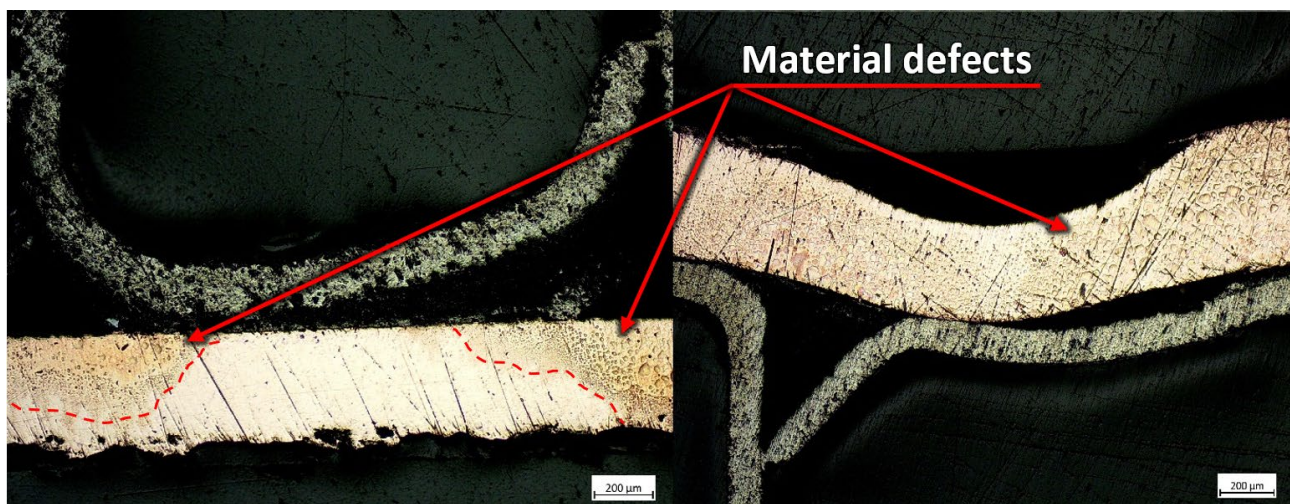


**Figure 4.** Tube-fin contact models

### 3. Results

#### 3.1. Microscopy analysis

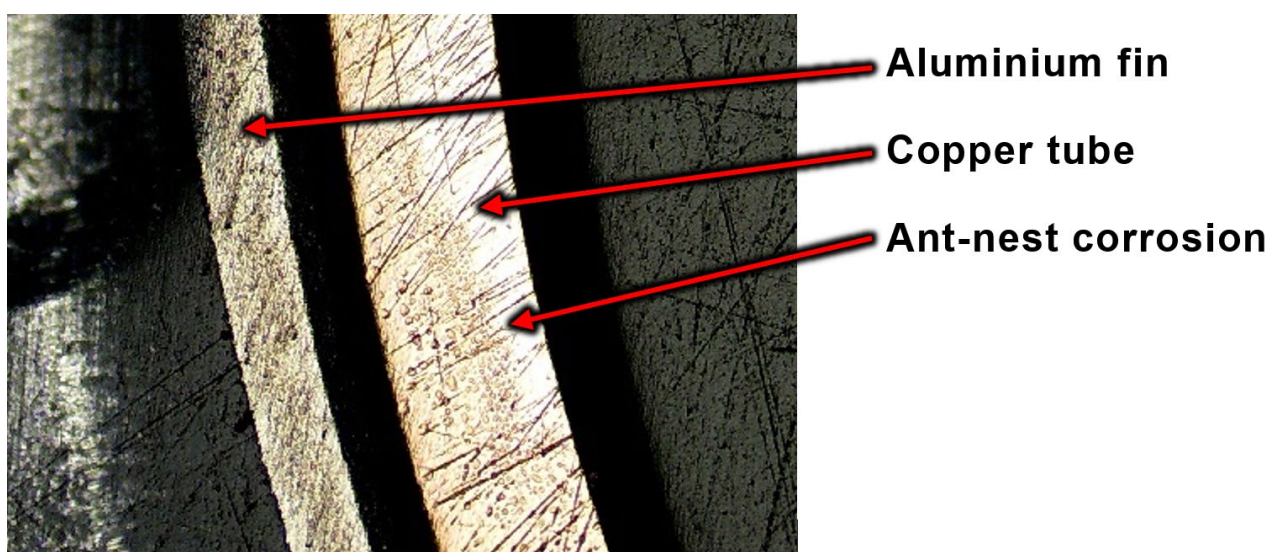
Despite expectations about galvanic corrosion taking hold in a heat exchanger consisting of copper pipes and aluminium alloy fins, no evidence was found of the electrochemical degradation of the latter. Interestingly, however, discoloration and spotty defects were detected on the other material in most of the samples, as pointed out on Figure 5.



**Figure 5.** Optical microscope image of a longitudinal section, with ANC marked

Some considerations and examples in the literature[4],[5] suggested that these imperfections are cases of ant-nest corrosion (ANC). This deduction is based on the visual appearance of the phenomenon, which closely matches the characteristic features of ANC, and the fact that it appears more frequently and is more widespread where there is a wider gap, thus more air is in contact with the exterior of the pipe.

This is significant because ant-nest corrosion is known to be facilitated by the presence of moisture and foreign particles in the air, which can penetrate these larger gaps more easily, promoting the corrosive process. The evidence for the above is also apparent on the images of the cross-section, demonstrated on Figure 6.



**Figure 6.** Optical microscope image of a cross section with clearly visible ANC

### 3.2. Gap size measurements

Gap size measurement data have been compiled into graphs seen on Figure 7. The red graph indicates the average gap value. The mean minimal gap size is 84  $\mu\text{m}$ , minimum is 19  $\mu\text{m}$ , maximum is 200  $\mu\text{m}$  of all investigated specimens.

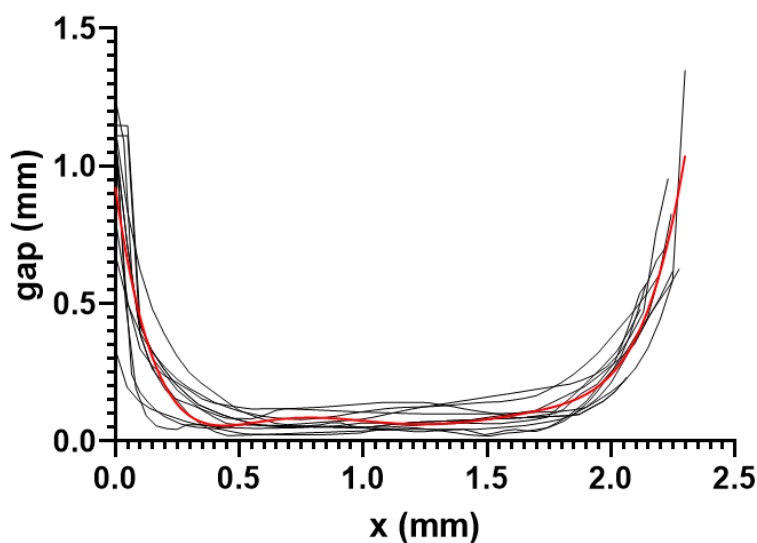


Figure 7. Superimposed gap-size graphs

### 3.3. FEA simulation results

The mean total heat transfer rate of the 11 models was found to be  $37.745 \pm 12.81\%$  of the idealized model (Table 1.). The total heat transfer rate of the mean gap size model was 36.26% compared to the idealized model.

Table 1. Simulation results

	Total heat transfer rate [W]	Total heat transfer rate relative to the idealized model
<b>idealized model</b>	<b>-136.325</b>	<b>100%</b>
<b>mean geometry model</b>	<b>-49.440</b>	<b>36.266%</b>
model 1	-64.004	46.950%
model 2	-85.803	62.940%
model 3	-74.726	54.815%
model 4	-55.452	40.677%
model 5	-36.962	27.113%
model 6	-45.231	33.179%
model 7	-49.534	36.336%
model 8	-33.700	24.720%
model 9	-34.048	24.976%
model 10	-40.294	29.557%
model 11	-46.265	33.938%
<b>mean of the separate models</b>	<b>-51.45674 ± 17.46</b>	<b>37.745% ± 12.81</b>

#### 4. Discussion

The results suggest that ageing increases the gap between the tube and fin of heat exchangers. The gap then causes various problems. The microscopy results demonstrated how ant nest corrosion occurs in the copper tubes near the gaps. These corroded areas may deteriorate heat transfer and may even cause the heat exchanger to leak. The gap formation reduces metallic contact between the tube and the fins, seriously reducing the heat transfer. It must be noted however that the measured gaps are likely not consistent on the whole circumference of the contact area. This means that the worsening of the heat transfer is not as high as the results of our analysis suggest, but still is significant.

The results also show that the mean gap size finite element model is an adequate substitute for series of simulations, thus can be used to accelerate calculations.

Thus, it would be beneficial to research methods countering the gap formation in ageing heat exchangers thus extending their lifespans.

#### 5. References

- [1] Y. K. Hing, V. R. Raghavan, and C. W. Meng, "Investigation of contact resistance for fin-tube heat exchanger by means of tube expansion," in *AIP Conference Proceedings*, 2012. doi: 10.1063/1.4704271.
- [2] A. Research Center and under Grant, *HEAT TRANSFER BETWEEN SURFACES IN CONTACT: AN ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE SMALL CONTACT RESISTANCE OF METALLIC INTERFACES*. 1971. Accessed: Jul. 28, 2024. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19710029272/downloads/19710029272.pdf>
- [3] T. Bitó, D. Csonka, T. Zsebe, and G. Vasvári, "Analysis of contact materials in finned tube heat exchangers: solders, solderability," Osijek: University of Slavonski Brod, Sep. 2023.
- [4] Z. Wang, H. Li, D. Cheng, S. Qin, D. Li, and X. Zhang, "A laboratory study of the failure analysis of copper tube used in the air conditioning heat exchanger," *Materials and Corrosion*, 2024, doi: 10.1002/maco.202314214.
- [5] L. Cozzarini, L. Marsich, and C. Schmid, "Ant-nest corrosion failure of heat exchangers copper pipes," *Eng Fail Anal*, vol. 109, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104387.



# Dilema oko zelene (energetske) tranzicije *Dilemma about the Green (energy) Transition*

M. Ivanović

Panon, institut za strateške studije, Osijek, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [panon.institut@gmail.com](mailto:panon.institut@gmail.com)

## Sažetak

U posljednjem desetljeću zelena (energetska) tranzicija postala je vodeća ideja energetske politike u suvremenom svijetu, a posebice u Europskoj uniji. U radu je dan pregled osnovnih odrednica zelene tranzicije i predloženih mjera. No, postoji niz dilema koje se javljaju u ovako definiranom modelu zelene tranzicije i upućuju na nedorečenost ili slabu utemeljenost ove energetske politike s globalnog, planetarnog gledišta. U zaključku su naznačene potrebne promjene u strategiji zelene tranzicije, s naglaskom na planetarni pristup.

**Ključne riječi:** Energetska politika, Zelena tranzicija, Planetarni pristup, Političko-ekonomske dileme, Politika zaštite okoliša

## Abstract

In the last decade, the green (energy) transition has become the leading idea of energy policy in the modern world, and especially in the European Union. The paper provides an overview of the basic determinants of the green transition and the proposed measures. However, there are a number of dilemmas that appear in the green transition model defined in this way and point to the vagueness or weak foundations of this energy policy from a global, planetary point of view. In the conclusion, the necessary changes in the green transition strategy are indicated, with an emphasis on the planetary approach.

**Key words:** Energy policy, Green transition, Planetary approach, Political-economic dilemmas, Environmental policy

## 1. Uvodne napomene

Početak XXI. stoljeća, a posebno od početka drugog desetljeća zelena (energetska) tranzicija postala je vodeća ideja razvojne i posebno energetske politike u suvremenom svijetu, a posebice u Europskoj uniji. Klimatske promjene i degradacija okoliša egzistencijalna su prijetnja Europskoj uniji i svijetu. Kako bi se prevladali ti planetarni izazovi, „*Europski zeleni dogovor*“ nova je strategija rasta koja treba transformirati EU u moderno, resursno učinkovito i konkurentno gospodarstvo. Europski zeleni dogovor ima za cilj učiniti Europu klimatski neutralnom do 2050. godine i potaknuti gospodarstvo putem zelene tehnologije, stvoriti održivu industriju i transport te smanjiti zagađenje. Pretvaranje klimatskih i ekoloških izazova u prilike treba da učine tranziciju pravednom i uključivom za sve. [1]



## 2. EU ODREDNICE ZELENE TRANZICIJE

### 2.1. Bitni elementi za provedbu politika zelene tranzicije

Europska centralna banka (ECB) razlikuje šest bitnih elemenata za provedbu politika zelene tranzicije. To su: održivi razvoj, energija, transport i mobilnost, okoliš i kružno gospodarstvo, istraživanje i inovacije te ozelenjivanje javnih i privatnih financija. [2]

#### 2.1.1. Održivi razvoj

EU je u potpunosti predana tome da bude predvodnik u provedbi (UN) Agende za održivi razvoj do 2030. godine, zajedno sa državama članicama. 17 ciljeva održivog razvoja (SDGs) odnosi se na poboljšanje života ljudi i zaštitu planeta od degradacije, tako da može odgovarati potrebama sadašnjih i budućih generacija. Od 2020. godine Europska komisija (EK) pojačala je analize i praćenje postizanja ciljeva održivog razvoja u procesu Europskog semestra. Usporedno s tim, države članice uvode ciljeve održivog razvoja u svoje politike i razvijaju ciljane politike kako bi krenule prema održivijem razvoju.

#### 2.1.2. Energija

Dekarbonizacija energetskeg sustava ključna je za EU postizanje klimatskih ciljeva 2030. i 2050. U isto vrijeme, energija mora biti sigurna i pristupačna za potrošače i poduzeća. Da bi se to dogodilo, države članice moraju transformirati svoje energetske sustave u potpuno integrirano, digitalizirano i konkurentno EU energetske tržište koje se uglavnom temelji na obnovljivim izvorima. Osim regulatornih reformi, države članice moraju omogućiti i promicati daljnja ulaganja u čistu energiju, uključujući energetske učinkovitost. Smanjenje emisije ugljika jedini je način da se izbjegnu najgori učinci klimatskih promjena. Zbog toga se EU obvezala na smanjenje emisija od 55% do 2030. i na nulto ugljično gospodarstvo do 2050. godine. Iako vlade i zakonodavci imaju primarnu odgovornost za pokretanje i podržavanje ove tranzicije ECB mora odraditi svoj dio promicanjem održivih financija i ozelenjivanjem operacija monetarne politike, ne dovodeći u pitanje primarni cilj - stabilnost cijena.

#### 2.1.3. Transport i mobilnost

Promet omogućuje ljudima, uslugama i robama slobodno kretanje unutar EU. To je kamen temeljac integracije u EU, povezuje ljude u različitim regijama i zemljama i daje veliki doprinos gospodarstvu. Potražnja za transportom nastavlja se i donosi prilike, ali i nove izazove. Naime, promet čini oko četvrtine emisija stakleničkih plinova u EU i jedan je od glavnih uzroka onečišćenja zraka u gradovima. Države članice traže načine za razvoj pametnih, održivih i učinkovitih prometnih rješenja.

#### 2.1.4. Okoliš i kružno gospodarstvo

Očekuje se da će pitanja degradacija okoliša sve više utjecati na gospodarsku aktivnost. Može uzrokovati ekstremne vremenske uvjete, utjecati na ljudsko zdravlje i učiniti prirodne resurse manje dostupnima. **Zaštita prirodnog kapitala EU** (bold M.I.), prijelaz na resursno učinkovito gospodarstvo i zaštita ljudi od pritisaka povezanih s okolišem ključni su prioriteti Europskog zelenog dogovora. Države članice sudjeluju u reformama kako bi odgovorile na te izazove daljnjim razvojem svojih politika i strategija zaštite okoliša.



### 2.1.5. Istraživanje i inovacije

Digitalne tehnologije imaju dubok utjecaj na naš način života i poslovanja. Države članice moraju imati kapacitet da iskoriste naše sve više digitalizirano društvo i da se suoče s izazovima koje ono donosi. To zahtijeva osmišljavanje politika i implementaciju inovativnih rješenja kako bi se tvrtkama dalo povjerenje, kompetencije i sredstva za digitalizaciju i rast. Sustavna i napredna strategija istraživanja i inovacija ključna je za produktivnije i zelenije gospodarstvo.

### 2.1.6. Ozelenjivanje javnih i privatnih financija

Kako bi se postigla ambicija Europskog zelenog plana, potrebna su značajna ulaganja. Privatni sektor imat će ključnu ulogu u financiranju zelene tranzicije. To zahtijeva dosljedne strategije, inovativne regulatorne okvire i pametne instrumente. Nacionalne vlade također će biti ključne u financiranju prijelaza slanjem pravih cjenovnih signala i preusmjeravanjem javne potrošnje prema održivim politikama. Također trebaju potaknuti potražnju za održivim dobrima i uslugama putem zelene javne nabave i smanjiti ugljični otisak javnih usluga. Čvrsti okvir upravljanja osigurat će da donositelji odluka budu odgovorni budućim generacijama.

## 2.2. Potpora nacionalnim vlastima

Kako bi odgovorio na rečene izazove Generalni direktorij Europske komisije za reforme (DG REFORM) podupire države članice u područjima: a) zeleni proračun i oporezivanje okoliša, b) zelena nabava; i c) održive financije i investicije. DG REFORM podupire nacionalne vlasti u osmišljavanju i provedbi reformi koje pomažu u rješavanju degradacije okoliša. Uredan prijelaz na zeleno gospodarstvo prilika je za sve, uključujući tvrtke i financijske institucije, da se ostvare koristi od čiste i jeftinije energije, tehnoloških inovacija i novih poslova. Zelena ekonomija dugoročno bi pridonijela stabilnosti cijena i financijske stabilnosti. Uredan prijelaz na zeleno gospodarstvo dugoročno bi smanjio rizike povezane s klimom za cijelo gospodarstvo i financijski sustav, kao i za izgled inflacije i imovinu u bilanci euro-sustava. Kao rezultat toga, to bi pridonijelo dugoročnoj cjenovnoj i financijskoj stabilnosti. [4]

## 2.3. Test stresa na klimu za EU gospodarstvo

Poduzeća i banke bit će ozbiljno pogođene ako ne razmotre važna pitanja klimatskih promjena. Uredan i brz prijelaz za minimiziranje troškova i maksimiziranje koristi nadmašuje kratkoročne troškove prijelaza na ekonomiju bez ugljika u srednjoročnom i dugoročnom razdoblju. Ulaganja u sektore i regije koji su u velikoj mjeri izloženi klimatskim rizicima bit će najviše pogođeni. Europska središnja banka (ECB) je obavila u rujnu 2021. godine tzv stres test na klimu za cijelo gospodarstvo testirajući utjecaj klimatskih promjena na više od četiri milijuna tvrtki diljem svijeta i 1600 banaka euro-područja prema tri različita scenarija klimatske politike. [5]

Rezultati pokazuju da tvrtke i banke imaju jasnu korist od ranog usvajanja zelenih politika za poticanje prijelaza na gospodarstvo bez ugljika. Test također otkriva da je utjecaj klimatskih rizika koncentriran u određenim regijama i sektorima euro zone. Konkretno, tvrtke koje se nalaze u regijama koje su najviše izložene fizičkom riziku mogle bi se suočiti s vrlo teškim i čestim prirodnim katastrofama, što bi zauzvrat utjecalo na njihovu kreditnu sposobnost.



Klimatski rizik uključuje i fizički rizik i rizik tranzicije. Fizički rizik je ekonomski učinak očekivanog povećanja učestalosti i magnitude prirodnih katastrofa. U Europi su fizički rizici neravnomjerno raspoređeni, pri čemu su sjeverne regije sklonije poplavama, a južne regije izloženije toplinskom stresu i šumskim požarima. Tranzicijski rizik je trošak uvođenja politika za smanjenje emisija CO<sub>2</sub>, posebno za određene industrije s visokim emisijama. Na primjer, industrije intenzivne proizvodnje ugljika, kao što su rudarstvo ili električna energija, imale bi znatne troškove za smanjenje emisija CO<sub>2</sub>, što bi povećalo njihovu vjerojatnost neplaćanja u kratkom do srednjem roku. Ipak, prijelaz na zelenije gospodarstvo također je i dobra prilika. Test pokazuje da prednosti ranog poduzimanja radnji nadmašuju početne troškove u srednjoročnom i dugoročnom razdoblju, također kao rezultat povećanja energetske učinkovitosti za tvrtke i nižih cijena energije u cjelini. *“Bez politika prijelaza na zelenije gospodarstvo, fizički rizici će se s vremenom povećati. Oni će se povećavati nelinearno, a zbog nepovratne prirode klimatskih promjena, taj porast će se nastaviti tijekom vremena. Ključno je prijeći rano i postupno kako bismo mogli ublažiti trošak zelene tranzicije i budući učinak prirodnih katastrofa”*, rekao je Luis de Guindos, potpredsjednik ECB-a.

Banke euro-područja mogle bi biti ozbiljno pogođene prema scenariju u kojem se klimatske promjene ne rješavaju. Pokazalo se da će očekivani gubici na kreditnim portfeljima poduzeća značajno porasti tijekom vremena, potaknuti sve većim fizičkim rizikom, s potencijalom da postanu kritični tijekom sljedećih 30 godina. Godine 2050. prosječni korporativni kreditni portfelj banke u euro-području ima 8% veću vjerojatnost da će bankrotirati u scenariju vrućeg svijeta nego u normalnoj tranziciji. Kada se razlikuju različiti kreditni portfelji, utjecaj izazvan klimatskim promjenama postaje još izraženiji, osobito tijekom vremena. Portfelji koji su najosjetljiviji na klimatske rizike imaju 30% veću vjerojatnost da neće biti realizirani 2050. u usporedbi s 2020. prema scenariju vrućeg svijeta. Konačni rezultati klimatskih testova otpornosti na stres u skladu su s preliminarnim rezultatima objavljenim u ožujku 2021. i nadopunjuju te nalaze uključivanjem procjena otpornosti banaka na klimatske rizike putem zajmova, osiguranja i vlasničkih udjela. ECB test stresa na klimu za cijelo gospodarstvo označava prvi korak u ECB klimatskom planu. Rezultati i metodologija služit će informacijama za nadzorni klimatski stres test 2022. za banke koje ESB izravno nadzire. Oni će također biti uključeni u klimatski stres test bilance Euro-sustava, koji se planira za prvo tromjesečje 2022. [6] [7]

#### 2.4. Djelovanje vlada

Financije su jedan dio rješenja prelaska na klimatski neutralno društvo i učinkovitu zaštitu okoliša, ali ne može biti zamjena za djelovanje vlade. Vlade imaju dvije ključne strategije koje su im dostupne; (a) **Strategija zaštite** putem koje strategije vlade štite postojeće klastere, pomažući im da se razvijaju, optimiziraju za otpornost i podržavaju ih da nastave napredovati kroz promjene i (b) **Strategija iskre** putem koje vlade potiču nove prilike za gospodarske klastere realizirajući njihovu rastuću zelenu konkurentsku prednost. Naravno, mnoge vlade koriste strateški portfelj strategija zaštite i strategija pokretanja. Inteligentnim i aktivnim kombiniranjem elemenata iz svakoga, vlade imaju priliku istovremeno zaštititi gospodarske klastere od poremećaja dok im omogućuju da uhvate novu vrijednost kako zelena tranzicija bude dobivala zamah. [8]



## 2.5. Pravedna tranzicija

Sve države članice EU, regije i sektori moraju pridonijeti prijelazu prema a klimatski neutralna ekonomija. Međutim, ljestvica izazova nije za sve ista. Regije ovisne o fosilnim gorivima i s industrijom intenzivnom na ugljik bit će posebno pogođene i bit će podvrgnute dubokim ekonomskim, ekološkim i društvenim promjenama. DG REFORM pomaže državama članicama da mobiliziraju resurse i poduzimaju radnje kako bi se osigurala ciljana podrška regijama i sektorima koji su najviše pogođeni ovom tranzicijom. Glavna uprava za reforme također podržava države u pripremi svoje teritorijalne pravednosti prijelazne planove koje će svaka država članica moraju izraditi kako bi dobili pristup financiranju od Mehanizam pravedne tranzicije. [9]

Fond za pravednu tranziciju (JTF) prvi je stup Mehanizma za pravednu tranziciju (JTM). To će biti ključni alat za potporu područjima koja su najviše pogođena prijelazom na klimatsku neutralnost pružajući im prilagođenu potporu. Provodi se pod podijeljenim upravljanjem, u okviru općeg okvira kohezijske politike, koja je glavna politika EU-a za smanjenje Fond će ublažiti socioekonomske troškove izazvane klimatskom tranzicijom, podupirući gospodarsku diversifikaciju i prenamjenu dotičnih teritorija. To znači podupiranje produktivnih ulaganja u mala i srednja poduzeća, stvaranje novih tvrtki, istraživanje i inovacije, obnovu okoliša, čistu energiju, usavršavanje i prekvalificiranje radnika, pomoć u traženju posla i programe aktivnog uključivanja tražitelja posla, kao i transformacija postojećih postrojenja s intenzivnim ugljikom kada ta ulaganja dovedu do značajnog smanjenja emisija i zaštite radnih mjesta. Očekuje se da će mobilizirati blizu 30 milijardi eura ulaganja. [10]

## 3. NEDOSTAJE PLANETARNI PRISTUP

U klimatskim politikama razvijenih zapadnih zemalja postoje niz rigidnih elemenata: Ovdje će se ukazati na dva: (a) planetarni pristup i (b) pitanje ekonomije temeljene na privatnom profitnom interesu.

### 3.1. Mjere EU su jednodimenzionalne

Sve mjere EU i drugih zapadnih i razvijenih država su jednodimenzionalne, odnosno nedostaje im planetarni pristup. S jedne strane se, npr.- promovira elektro mobilnost, osiguravaju financijske sredstva za razvoj elektro-prometala, za njihovu proizvodnju i nabavku, ali nema bilance na planetarnoj razini koliko to ugrožava planet (prirodu) u cijelom lancu vrijednosti - od rudnika bakra, proizvodnje kablova, rudarenja litija (za električne baterije) itd. EU je sačinila plan da se Švedi, Holandezi i drugi EUropljani voze elegantno električnim automobilima, bez da se sagledavaju ukupne (a) energetska, (b) materijalna i (c) klimatska bilanca; institucije EU-a nije briga za domorodce u Čileu, Kolumbiji, Australiji, Kini. Nigeru (npr.) a od skora i u ne-EU zemljama u Europi (npr. Srbija. – rudarenje litija). O svim strateškim dokumentima vladajuća je jednodimenzionalna logika - brine se samo o interesu EU (članica EU), a nema ni naznaka o planetarnim posljedicama takve zelene tranzicije. Jedna od bitnih crta EU zelene tranzicije je „**Zaštita prirodnog kapitala EU**“ (a ne **zaštita prirodnog kapitala planete** (!)).

Zanimljivo je da se u temeljnom strateškom dokumentu „Europski zeleni dogovor“ (The European Green Deal) govori o zelenoj tranziciji samo u EU zemljama.. Da se ne bi kazalo kako nema planetarnog pristupa - postoji drugi dokument „Klimatske akcije EU-a diljem svijeta“ (EU Climate Action Around the World) u kojem se razmatraju aktivnosti EU institucija glede klimatskih promjena i zelene tranzicije. EU autori u tekstu navode: *„Klimatske promjene su globalni fenomen. Moramo smanjiti globalne emisije stakleničkih plinova – njihovo smanjenje samo u EU nije dovoljno. Zato EU nastoji promicati klimatske akcije diljem svijeta. Sa zemljama izvan EU radimo bilateralno (jedan na jedan) i multilateralno (kao grupa)“*. Ovaj odjeljak govori o multilateralnom klimatskom djelovanju te se navode provedene aktivnosti glede: UN konvencije o klimi (UNFCCC iz 1992.), Kyoto protokolu (1997.), COP konferencijama, Pariškom sporazumu (2015.), COP28 (Dubai, 2023.), međuvladinom, panelu o klimatskim promjenama (IPCC), forum G7 i G20 itd. EU i zemlje članice imaju aktivnu ulogu u promicanju i sponzoriranju specifičnih inicijativa za ublažavanje i prilagodbu klimatskim promjenama diljem svijeta. U ovom dijelu opisa EU klimatske politike opisuje se angažman EU u klimatskim akcijama sa zemljama koje nisu članice EU-a, Prioriteti za bilateralni klimatski angažman sa susjednim zemljama EU-a, Klimatska suradnja EU-a s azijsko-pacifičkom regijom, Prioriteti za bilateralni klimatski angažman sa zemljama azijsko-pacifičke regije, Klimatska suradnja EU sa zemljama Sjeverne i Latinske Amerike, Klimatska suradnja EU-a s Afrikom,. [11]

A kakav je to angažman ilustrira naredni izvadak iz izvještaja o suradnju s Čileom:: *„Prvi dijalog na visokoj razini o klimi i okolišu između EU-a i Čilea – jačanje suradnje u politici djelovanja za okoliš i klimu 16.10.2023 . Na prvom Dijalogu na visokoj razini o klimi i okolišu, visoki dužnosnici iz EU-a i Čilea složili su se da će zajedno raditi na suočavanju s hitnim izazovima okoliša i klime. Ovaj dijalog rezultat je predanosti koju su izrazili predsjednik Republike Čile Gabriel Borić i predsjednica Europske komisije Ursula von der Leyen te predstavlja konkretan primjer dublje suradnje između EU-a i Čilea na ključnom pitanju zajednički prioritet, u skladu s nadolazećim potpisivanjem novog naprednog okvirnog sporazuma između EU-a i Čilea. Tijekom dijaloga obje su strane razgovarale o zajedničkim prioritetima kao što su put do pravedne tranzicije za klimatske akcije, borba protiv gubitka bio-raznolikosti, očuvanje šuma, krčenje šuma, kao i suradnja na području kružnog gospodarstva, plastike i vode. U skladu sa svojim međunarodnim obvezama, složili su se da će nastaviti promicati prijelaz na nisko-ugljična, kružna i čista gospodarstva u kojima se priroda štiti i obnavlja. Objе su strane ponovno potvrdile svoju nepokolebljivu predanost Pariškom sporazumu i promicanju povećanih mjera u ovom desetljeću kako bi se smanjile globalne emisije kako bi se održala granica od 1,5 °C porasta temperature nadohvat ruke. Također su razmijenili informacije o svojim politikama određivanja cijena ugljika io mjerama koje su uvedene za smanjenje emisije CO<sub>2</sub> i drugih stakleničkih plinova te su pregledali svoju suradnju u pogledu šumskih požara i spremnosti na klimatske katastrofe. Sudionici su također raspravljali o mogućnostima za bližu suradnju na očuvanju, obnovi i održivom korištenju bio-raznolikosti u skladu s Globalnim okvirom za bio-raznolikost Kunming – Montreal. Nadalje, razmijenili su i politike i najbolje prakse kako bi njihova gospodarstva učinili održivijim i manje ugljično intenzivnim i zagađujućim, uključujući ubrzanje prijelaza*

*na kružno gospodarstvo i suradnju u smjeru ambicioznog globalnog sporazuma za rješavanje problema onečišćenja plastikom. [12]*



**Slika 1.** Rudnik bakra Chuquicamata (Čile) [13]

Ovdje treba naglasiti da je malo znanstvenih radova o mračnoj strani obnovljivih izvora energije ili zelene tranzicije. Ono malo što se objavilo razmatra pitanje dnevnih-sezonskih oscilacija u proizvodnji električne energije u vjetro i solarnim elektranama. Nema polit-ekonomskih analiza niti globalnih ekoloških nedoumica glede rečenih pitanja o zelenoj tranziciji. No, pojavljuje se niz dokumentarnih filmova i novinskih članaka u kojima ekološki aktivisti i poneki znanstvenici ukazuju na devastaciju prirode, totalno zagađenje rijeka i plodnog zemljišta, uništavanja šuma i izumiranje niza životinjskih vrsta. Slika 1 prikazuje otvoreni kop rudnika u Čileu; Chuquicamata najveći rudnik bakra na svijetu po miniranom području s proizvodnjom od 500.000 tona bakra godišnje. U dokumentarnom filmu „Tamna strana zelene energije“ – koji je emitiran 13. studenog 2020. na televiziji „Al Jazeera Balkans“ ukazuje se, između ostalog, na totalnu zagađenost jedine rijeke u toj regiji gdje je površinski kop najvećeg rudnika bakra na svijetu u Čileu tako da je voda iz rijeke (koja se upotrebljava za ispiranje rude bakra) uništena za živi svijet. O tome govori i znanstven rad pod lit [14]. Rad analizira posljedice rada postrojenja za obradu sulfida u Chuquicamati. Godine 1952. rudnik je povećao potrebe za vodom ograničavajući opskrbu regionalnog stanovništva pitkom vodom, a pogrešna javna politika prisilila je stanovništvo regije da konzumira vodu rijeke Toconce otrovane arsenom što je izazvalo teške posljedice na zdravlje stanovnika pustinje Atacama

Mali broj radova o tamnoj strani zelene tranzicije je posljedica neoliberalizma i profitnog odnosa u znanosti; znanstvenici su ovisni o dobivanju financija za projekte i ne žele se protiviti političkim strukturama. [15]

- Cobus van Staden, direktor China Global South Projecta upozorio je da zelena tranzicija ima prljavu tajnu – neutaživu glad za resursima iz siromašnijih zemalja. Sustavno crpljenje sirovina iz Afrike, Latinske Amerike, Azije i Bliskog istoka već je nevjerojatno obogatilo razvijeni dio svijeta te uzrokovalo uništavanje okoliša, kršenje ljudskih prava i ostavilo globalni jug na marginama globalne ekonomije. Van Staden ističe da trenutno ne postoji način da se proizvede dovoljno litija, nikla, kobalta, mangana, paladija i drugih materijala

potrebnih za baterije te da su to neke od najpriljubljenih tehnologija na svijetu. Štoviše, utrka velikih sila u energetske tranzicije prijeti obnavljanjem kolonijalističkih odnosa, ustvrdio je. U Latinskoj Americi i Aziji rudarske zemlje već plaćaju visoku cijenu u ekologiji i ljudstvu da bi Zapadu omogućile da prijeđe na zelenu energiju. [16]

- Mladen Smrekar citira studiju iz časopisa Current Biology i upozorava da proizvodnja zelene energije prijeti istrebljenjem 4.642 životinjske vrste. [17]

### 3.2. Pogubna politika profita privatnog vlasništva

Kapitalistička politika profita privatnog vlasništva umnogome je utjecaja na planetarnu devastaciju prirode u posljednjih 200 godina i upravo je začuđujuće da ova civilizacija ne odustaje od toga gospodarskog modela i u klimatskoj i ekološkoj krizi. Da parafraziramo Einsteina – Ne možemo riješiti problem koristeći isti način razmišljanja kao kad smo stvorili problem. [15] Počnimo od banalnog primjera pristupa znanstvenim radovima koji razmatraju klimatske promjene i energetske tranzicije. Autori radova besplatno ustupaju svoje radove časopisima (nakladničkim kućama) koje onda prodaju te radove za cca 25 dolara. „*Prema CBC News, najveći profitni znanstveni izdavači izvješćuju o profitnim maržama od gotovo 40 posto, što neke od tih marži čini čak višima od onih tvrtki poput Applea i Googlea.*“ [18] Na taj način niz znanstvenika je ograničeno u svome radu i davanju doprinosa zelenoj tranziciji. O tome vrlo pregledno piše Martin Hagve – s Odjela za gastrointestinalnu kirurgiju, Sveučilišne bolnice Sjeverne Norveške i postdoktorski suradnik na Istraživačkoj grupi za gastrokirurgiju, Sveučilišta Tromsø. [19]

*„Akademsko izdavaštvo ima velik financijski promet. Njegova svjetska prodaja iznosi više od 19 milijardi USD, što ga pozicionira između glazbene industrije i filmske industrije. Tržištem uglavnom dominira pet velikih izdavačkih kuća: Elsevier, Black & Wiley, Taylor & Francis, Springer Nature i SAGE, koje međusobno kontroliraju više od 50 % tržišta. Elsevier je najveći, s približno 16 % ukupnog tržišta i s više od 3000 akademskih časopisa. Kao industrija, ove su izdavačke kuće jedinstvene u pogledu svoje profitabilnosti, ostvarujući veliku neto dobit. Elsevier ima profitnu maržu koja se približava 40 %, što je više od tvrtki poput Microsofta, Googlea ili Coca Cole, a krivulja je usmjerena prema gore. Ova golema zarada uopće nije iznenađujuća. Razlog se može ilustrirati usporedbom s tradicionalnim novinama, čiji je profit obično u rasponu od 10 do 15 %. Novine snose troškove plaća za svoje novinare, urednike i grafičare, kao i troškove za istraživanje, provjeru činjenica, tiskanje i distribuciju. Sve se to mora platiti kroz prodaju i oglašavanje. Akademski časopisi su lukavo uspjeli okrenuti ovu situaciju naglavce. Proizvodnja sadržaja plaća se sredstvima za istraživanje, kako plaćama istraživača tako i znatnim troškovima uključenim u poduzimanje istraživanja. Moje je vlastito iskustvo da većina akademskih urednika radi samo za simboličnu plaću, a da se kontrola kvalitete i provjera činjenica obavljaju putem recenzije, što je **neplaćeni volonterski rad**. Budući da je gotovo sav pristup digitalan, čak ni ispis više ne mora predstavljati trošak. Kao rezultat toga, jedini pravi trošak nastaje grafičkim dizajnom članka. Zanimljivo je primijetiti kako se sve to financira. Kao i u mnogim drugim zemljama, većina financiranja istraživanja u Norveškoj dolazi od vlade. Time država financira sve faze produkcije istraživanja, ali zatim mora ponovno platiti za pristup rezultatima istraživanja. A takav pristup nije jeftin. U navedenim izdavačkim kućama jedan*



*članak stoji 30-50 USD. Norveške javne institucije plaćaju približno 330 milijuna NOK za pretplatu, a brojka za Europu u cjelini procijenjena je na 420 milijuna EUR. S obzirom na niske troškove nakladničkih kuća, ti su iznosi potpuno nerazumni.,*

Sada možemo ukazati da su daleko veći iznosi profita i veće negativne posljedice profitnog odnosa kada je u pitanju rudarenje zelenih sirovina ili proizvodi koji treba da smanje ugljični otisak. I tu se ostvaruju enormni profiti opet na teret države, nerazvijenih zemalja i/ili prirodnih resursa. Planet (klima i sl.) se uništava, ali od profita za privatne investitore se ne odustaje.

#### 4. Zaključak

Naša razmatranja su ukazala na dvije bitne dileme u konceptu i procesima zelene tranzicije glede klimatskih promjena:

- a) Jednodimenzionalnost mjera u zelenoj tranziciji tj. odsustvo planetarnog pristupa, jer se ne izračunava lanac energetske input-outputa.
  - b) Pogubnost politike profita privatnog vlasništva u aktivnostima zelene tranzicije.
- Kada je u pitanju planetarni pristup potrebne su energetske analize (izrada bilanci – izračun energetske lanca) za sve ključne aktivnosti - kako bi se pokazala tj. dokazala krajnja učinkovitost planiranih mjera na planetarnoj razini.
  - Kada su u pitanju: (a) pokretanja rudarenja za strateške sirovine, (b) izgradnja velikih energetske postrojenja i (c) pristup znanstvenim radovima glede zelene tranzicije trebalo bi postojeće politike profita privatnog vlasništva zamijeniti drugim modelom – principom domaćinskog poslovanja koji ne podrazumijeva financijsku dobiti, jer su nastojanja da se ostvare civilizacijski planetarni ciljevi – gdje profitu nije mjesto.

O navedenim pitanjima je potrebno pokrenuti planetarnu znanstvenu raspravu.

#### 5. Literatura

- [1] European Commission: The European Green Deal;  
[https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (pristup 6.7.2024.)
- [2] The European Central Bank: Firms and banks to benefit from early adoption of green policies, ECB's economy-wide climate stress test shows;  
<https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2021/html/ecb.pr210922~59ade4710b.en.htm>  
I (pristup 8.7.2024.)
- [3] European Commission: Green transition  
[https://reform-support.ec.europa.eu/what-we-do/green-transition\\_en](https://reform-support.ec.europa.eu/what-we-do/green-transition_en) (pristup 9.7.2024)
- [4] European Commission: Just transition  
DG for Structural Reform Support, Technical support for implementing the European Green Deal; ISBN 978-92-76-18595-6; HT-03-20-309-EN-N, Luxembourg: 2020
- [6] The European Central Bank: Supporting the green transition  
[https://www.ecb.europa.eu/ecb/climate/green\\_transition/html/index.en.html](https://www.ecb.europa.eu/ecb/climate/green_transition/html/index.en.html) (pristup 10.7.2024)
- [7] The European Central Bank; Stress test:

- <https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2021/html/ecb.pr210922~59ade4710b.en.htm>  
I (pristup 11.7.2024)
- [8] DG Structural Reform Support - Technical support for implementing the European Green Deal  
[https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/actions-being-taken-eu/just-transition-mechanism\\_\(pristup 12.7.2024\)](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/actions-being-taken-eu/just-transition-mechanism_(pristup%2012.7.2024))
- [9] European Commission; Just transition  
[https://reform-support.ec.europa.eu/what-we-do/green-transition\\_en](https://reform-support.ec.europa.eu/what-we-do/green-transition_en) pristup 9.7.2024)
- [9] European Commission  
[https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal/just-transition-mechanism/just-transition-funding-sources\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal/just-transition-mechanism/just-transition-funding-sources_en) (pristup 12.7.2024.)
- [10] European Commission  
[https://investeu.europa.eu/contribution-green-deal-and-just-transition-scheme\\_en](https://investeu.europa.eu/contribution-green-deal-and-just-transition-scheme_en)  
(pristup. 13.7.2024.)
- [11] European Commission: Climate Global Action  
[https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/global-climate-action\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/global-climate-action_en) (pristup 14.7.2024.)
- [12] European Commission: Climate action Chile  
[https://www.eeas.europa.eu/delegations/chile/first-high-level-dialogue-climate-and-environment-between-eu-and-chile-%E2%80%93-stepping-cooperation\\_en?s=192](https://www.eeas.europa.eu/delegations/chile/first-high-level-dialogue-climate-and-environment-between-eu-and-chile-%E2%80%93-stepping-cooperation_en?s=192)  
(pristup. 15.7.2024.)
- [13] Foto: Diego Delso; licenca: CC BY-SA 4.0;  
[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47636972\\_\(pristup. 7.7.2024.\)](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47636972_(pristup%207.7.2024.))
- [14] Damir G. Mandakovic, Francisco Rivera; Copper sulfide mining at Chuquicamata and the spread of arsenic in drinking water in Chile, 1952–1971: A derivation of extractivism; *The Extractive Industries and Society*, Volume 11, September 2022
- [15] Milan Ivanović; *Tri eseja o znanosti - drugo dopunjeno i prošireno izdanje*  
ISBN 978-953-6032-55-6226, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2008.
- [16] Cobus van Staden; Zelena tranzicija ima prljavu tajnu  
<https://pametni-gradovi.eu/sastavnice-pametnog-gradova/gradevinarstvo-urbanizam-i-energetika/tamna-strana-zelene-energije-pohod-na-resurse-globalnog-juga/>
- [17] Mladen Smrekar; Proizvodnja zelene energije prijete istrebljenjem 4642 životinjske vrste  
<https://www.bug.hr/istrazivanja/proizvodnja-zelene-energije-prijete-istrebljenjem-4642-zivotinjske-vrste-42633> (pristup 16.7.2024.)
- [18] The Electrochemical Society; For-science or For-profit?  
<https://www.electrochem.org/for-science-or-for-profit/> (pristup. 17.7.2024.)
- [19] Martin Hagve; The Money Behind Academic Publishing  
<https://tidsskriftet.no/en/2020/08/kronikk/money-behind-academic-publishing> (pristup 18.7.2024.)



# The Concept of Energy-Efficient Textile Industry

M. Glogar<sup>1</sup>, I. Čorak<sup>1,\*</sup>

University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb, Croatia

\*Corresponding author. E-mail: [ivana.corak@tff.unizg.hr](mailto:ivana.corak@tff.unizg.hr)

**Abstract:** This article analyses the concept of the sustainable and energy-efficient textile industry against the background of the problems faced by the textile industry worldwide, which result from its heterogeneity and duality. In recent decades, considerable research and development efforts have been made to transform conventional manufacturing processes in the textile industry with the aim of overcoming the problems of high pollution rates, high energy consumption and inefficiency. Despite its rapid growth, the textile industry is one of the largest energy consuming industries with the lowest efficiency in terms of energy use. Therefore, it is no longer possible to use conventional technologies and processes for manufacturing. Sustainable, energy-saving processes must be used. Technological progress plays an important role in increasing energy efficiency and is also the basis for promoting economic growth. Therefore, the introduction of the technological innovations to increase energy efficiency in textiles will be presented. The analysis presented in the paper also considers the Industry 4.0 paradigm and digitalization in the context of its applicability to the textile industry and the transition to innovative smart manufacturing. The article presents the framework of the European strategy for the development of the textile industry till 2030, in order to realize the concept of sustainable and circular textiles. The strategy considers the entire life cycle of textile products and proposes coordinated actions for change not only in textile production processes, but also in the global consumer awareness of the use and subsequent disposal of textiles.

**Key words:** energy efficiency, renewable energy, textile industry, technological innovation, European strategy 2030.

## 1. Introduction

The importance of the conceptual approach to sustainable production is no longer in question and therefore does not need to be emphasized or explained. Sustainability is indispensable; it is the paradigm of the future of the textile industry. The modern textile industry is faced with the problem that it is both - one of the world's most strategic industries and one with the greatest negative impact on the environment. On a global scale, the textile and clothing industry is one of the largest, but unfortunately also one of the most environmentally damaging industries. Environmental problems are mainly related to the consumption of energy, water and chemicals, direct CO<sub>2</sub> emissions and solid waste. As textiles are an inseparable part of human existence, the history of textiles can be equated





with the history of mankind. It can be said that textiles are the "fabric of civilization" and that textiles have created the world. Textiles are therefore irreplaceable and, with their multifunctionality, will certainly continue to be essential for humanity in the future. The textile industry is therefore facing a major challenge, namely the transition from a notorious industry to a more sustainable one.

The textile industry plays an important role in society and the environment and has an impact on various aspects of modern life. It creates jobs, influences culture and provides access to clothing, but also faces challenges related to sustainability. The textile industry is an important source of employment, contributes significant revenues to the global economy and promotes economic development in many countries. As stated in the European Textile Platform document, 2022 Strategic Research and Innovation Agenda to Underpin the EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles, the global textile and apparel industry is currently undergoing the most profound transformation since the mass production of synthetic fibers and the industrial production and distribution of textile-based consumer goods in the 1950-60s. The industrial age concept of efficiently supplying a growing consumer class with affordable and fashionable textiles and garments, which has been driven to unsustainable levels by the cheap, fast and disposable fashion of recent decades, needs to be replaced by a more sustainable, value-based operating model that promotes quality, durability, resource efficiency and resilience. The sustainable transformation of the textile industry is a real systemic challenge that requires determination to change and massive investment from all stakeholders over a long period of time. The transformed operating model is not only imaginable but also practically achievable, bringing multiple benefits to people, institutions and the economy [1, 2].

## **2. Energy – efficient textile industry**

In general, more than 50 % of thermal energy and around 70 % of electricity is used in various processes in the textile industry. Approximately 40 % of the total energy used by the textile industry is consumed in dry processing. Dry processes use energy mainly electric power for machine drive. The other 60 % is consumed in wet processing. Around 34 % of energy is used for spinning, 23 % for weaving, 38 % for chemical treatment and a further 5 % for various purposes. Most electricity is consumed in the spinning/weaving processes, while chemical treatment mainly uses thermal energy. The highest electricity consumption in the textile industry is in the production of yarns and fabrics, which account for 75-80 % of total electricity consumption in the textile factory [3-5].

The textile industry therefore no longer has the option of using conventional technologies and processes for production. It must introduce agile, modern and ingenious processes in order to save energy in every respect. A study conducted by Khan, Hou, Zakari & Tawiah in 2021 based on global data shows that 61 % of total energy consumption in the textile industry is fuel energy and 39 % is electricity. In addition, the textile industry is the fifth largest consumer of steam among the 16 major industrial sectors. The same study found that 36 % of the energy used is lost on site. On-site motor and drying systems account for

the largest share of energy wastage (15 %), followed by distribution (9 %) and boiler losses (7 %) [6].

According to the Ministry of Economy and Sustainable Development's annual Energy Report 2022, the textile, leather and footwear sector (Figure 1) consumes the least total energy of the entire industrial sector. Comparing the data from 2017 and 2022 shown in Figure 2, a slight decrease in total energy consumption can be observed.

This cannot be attributed to the alleged negative trend of the sector's development, as it is actually reversing despite negative publicity, but is partly due to the systematic investment in research and development of innovative solutions to reduce energy consumption, water resources and the transition to sustainable production. In terms of type of energy, the report shows that gas energy accounts for the largest share, immediately followed by electrical energy consumption, and biomass and thermal energy for the smallest share [7].

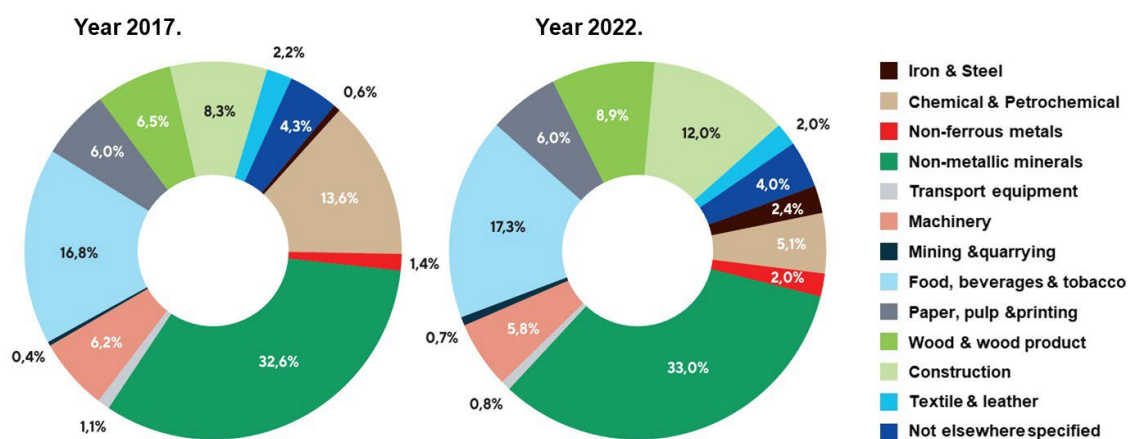


Figure 1. Final energy consumption by the industrial sector [7]

The textile industry is taking important steps towards energy efficiency thanks to the development of technologies. These innovations are transforming the industry by both increasing environmental sustainability and reducing costs. The concept of energy saving in the textile industry can be seen in the context of the production process itself, but significant improvements and savings can also be made in general aspects such as energy management systems in buildings (insulation, lighting, motion sensors, solar panels etc.). In the context of innovation, development and functionalization, several fundamental directions can be summarized: automation, digitalization of the production process, use of renewable energy, use of energy-friendly materials, education and awareness. Automation and the development and integration of intelligent sensors in the production process optimize energy consumption and increase energy efficiency. Sensors make it possible to monitor the precision and efficiency of machines and thus minimize energy losses and unnecessary consumption. Automation enables greater precision and speed in the production process, which also has an indirect positive effect on energy consumption. The digitalization of certain parts of the process and the application of digital technologies such as 3D printing and digital textile printing, which enable a shorter and more flexible production

process, contribute significantly to energy savings. Perhaps the biggest challenge at the moment is the introduction of the use of renewable energy sources such as solar panels, wind turbines and the use of sustainable forms of energy from bio and textile waste. Training employees in the textile industry in energy efficiency is also important to ensure that they adopt innovations in the sector [8].

### 3. Focus Areas for Energy Conservation in Textile Production

The textile industry is one of the most complex industrial chains in the manufacturing industry. It is a fragmented and heterogeneous sector. The characterization of textile production is complex due to the great variety of substrates, processes, machines and components used, as well as the finishing steps. Different types of fibers or yarns, fabric manufacturing processes and finishing processes (preparation, printing, dyeing, chemical/mechanical finishing and coating) are interlinked in the production of the finished fabric. The textile industry, in general, is not considered an energy intensive industry. However, the textile industry comprises a large number of plants, which all together consume a significant amount of energy. The **spinning** sector is one of the most important energy-consuming sectors in the textile industry. It is therefore also one of the main sources of pollution. *Koc and Kaplan* calculated the energy consumption for spinning different types and quantities of yarn. For all fiber types, spinning a finer yarn consumes more energy. Yarn for weaving, for example, is spun more than yarn for knitting. In addition, the production speed for weaving yarns is lower than for knitting yarns. Consequently, more energy is used to weave yarns with the same thread count. In addition, the energy consumption for combed yarn with the same thread count is higher due to the additional production step (combing) [9, 10]. Ring spinning is one of the most important techniques in yarn production. In the ring spinning process, the card and the ring frame consume most of the energy in the yarn manufacturing plant. Energy-efficient machines and optimization of the process can reduce energy consumption in the spinning process. Some aspects of the energy-saving approach are the use of energy-saving motors, adjustment of speed and waste control, replacement of ring spinning machine gears and belt, proper maintenance and cleaning of the machines. Air conditioning is also one of the energy consuming factors in the textile industry. Different departments have their own temperature ranges that should be maintained for efficient work. However, energy consumption can be reduced by modernizing the air conditioning system [11]. **Fabric manufacturers** are also under increasing pressure to adopt sustainable production practices that minimize their environmental footprint, reduce resource consumption and address social and ethical issues throughout the supply chain. The first step in the production of woven fabrics, **warping** and **sizing**, requires energy-powered machinery. Energy consumption can be reduced by using energy-efficient machines, recycling sizing material and optimizing processes in these stages. In the **weaving mill**, a lot of electricity is needed to power the looms, which can be overcome by upgrading to modern, energy-efficient looms and optimizing the weaving processes to significantly reduce energy consumption. The introduction of effective quality control methods and sustainable packaging techniques can also reduce energy consumption in these areas. Energy

consumption can also be optimized in compressors used in various weaving processes, such as driving air-jet weaving machines and pneumatic devices. Proper and timely maintenance can prevent air leaks and ensure peak performance. In addition, the selection of energy-efficient compressor models and the implementation of load management systems can contribute significantly to energy savings. Weaving mills also require temperature and humidity control, which is achieved through the systems that consume electricity. Programmable thermostats, regular filters and investment in energy efficient HVAC systems can effectively reduce energy consumption. Water jet weaving and similar processes use water that can be energy intensive to heat and pump for processes such as washing. Introducing closed water loops, recycling water and optimizing water consumption can reduce the associated energy consumption [12-14]. **Wet processes** require a high consumption of thermal energy for steam processing and heating. The energy consumption in wet processing depends on various factors, such as the shape of the product to be processed (fiber, yarn, fabric, cloth), the type of machine, the type of process, the condition of the final product, etc. A considerable part of the heat energy in a dyeing plant is lost through waste water losses, heat release from the equipment, exhaust gas losses, evaporation of liquid surfaces, unrecovered condensate, losses during condensate recovery and product drying (e.g. due to over-drying). The thermal energy is generated by burning fossil fuels, which releases greenhouse gasses into the environment. Sustainability in textile processing can be improved by applying various practices and strategies, such as using biodegradable materials, using environmentally friendly chemicals, natural dyes, processing enzymes, treating waste before disposal, reusing materials and resources, recycling and upcycling textile waste, and energy efficient/renewable energy processes [15]. In **pretreatment** processes that include desizing, decolorizing, bleaching and mercerizing, for example, the innovative approach of using the environmentally friendly and water-soluble biopolymer-based sizing agent would reduce energy and water consumption by simply removing sizing agents. In washing and bleaching processes, the processing of enzymes at low temperatures reduces fuel consumption and energy costs. Sustainability in **dyeing** can be achieved primarily through innovations in dye structures, dyeing processes and dyeing equipment. Supercritical liquid dyeing of polyester fabrics is an environmentally friendly and cost-effective technique. The main attractiveness of this process lies in the waterless technology, the low energy requirement and the recovery of residual dyes. By dyeing in air, water and energy consumption can be significantly reduced, which benefits the environment. The reduction in greenhouse gas emissions and energy consumption with air dyeing technology is 84 % and 87 % respectively. Digital **printing** is a good alternative textile printing technique that is suitable for both short- and long-term textiles. This technique eliminates the screen printing process, saving energy, water and chemicals [16]. The application of sustainable methods of surface **functionalization of textiles** can also lead to more environmentally friendly and cost-effective production. Plasma treatment is one such process that does not use solvents or an aqueous medium. The use of enzymes in the functionalization of textile surfaces is also an environmentally friendly option. The implementation of these and similar innovative strategies minimizes water and energy

consumption through optimized manufacturing processes, improved dyeing techniques and investments in wastewater treatment plants and energy-efficient technologies [17, 18].

**Thee example: Energy audit of a textile company: A case study of finishing textile [19]**

*Naqvi et al.* described the case study of providing the blueprint for energy optimization in textile industry by integrating the insights from the audit's comprehensive analysis. They confirmed that the findings from the audit would lead to significant cost savings and contribute to the industry's transition towards a more sustainable and environmentally responsible future. A quantitative and qualitative analysis of energy consumption in textile finishing processes was carried out and inefficiencies in equipment and facilities were identified. By performing regression analysis and energy performance modeling, energy saving measures were proposed, including power factor correction, rewind motor replacement, lighting improvement, thermal insulation and steam condensate recovery. The proposed measures were additionally analyzed using simulation models and cost-benefit analyzes, and the applicability of these measures was confirmed. The measures also offer a concept for energy optimization that can be adopted by the entire textile industry in order to reconcile economic goals and environmental protection.

**4. Textile waste as potential energy source**

Textile waste has great potential as a source of energy. Used textiles consist mainly of cotton and viscose fibers and, thanks to their cellulose content, have considerable potential for the production of various biofuels, such as biogas. Of the total textile production worldwide, cellulose accounts for about 40 % of fiber consumption. *Jeihanipour et al.* conducted an interesting study, already back in 2013, investigating the production of biogas from textile waste under discontinuous and semi-continuous conditions, from cotton/polyester and viscose/polyester waste. The same research group also developed a process to separate the cellulose content from waste textiles using an environmentally friendly cellulose solvent, i.e. N-methylmorpholine N-oxide (NMMO), to facilitate the production of biogas or bioethanol from waste textiles. In addition to cellulose, textile biowaste consisting of hemicelluloses, proteins and starch can also be used as cost-effective raw materials for the biotechnological production of bioenergy. The waste comes from the cultivation and processing of natural fibers, yarn spinning, fabric and clothing processing and the post-consumer sector. It is assumed that a total of 148 million tons of textile waste will be generated in 2030, of which more than 35 % will be cellulose-based [20, 21].

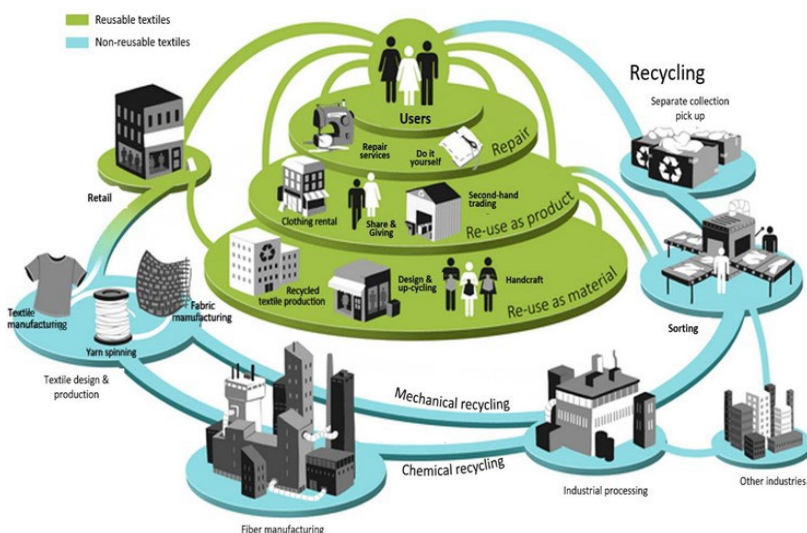
A more recent study was conducted by *Anacleto and colleagues*, who investigated the performance of certain chemical, physical and biological treatments with the aim of improving the biodegradability of textile waste, as opposed to the established application of anaerobic digestion (AD). The authors point out that the efficiency of anaerobic digestion as a sustainable strategy for converting waste into clean energy is limited due to the presence of residues, chemicals and toxic substances. Even before, there are studies in the literature that suggest and confirm the advantages of pretreatment in biogas production processes from textile waste. By applying pretreatment, not only does the degradability of organic

matter improve, but the biogas yield increases and further removal of dyes and toxic compounds from waste water and, as well as solid impurities from aqueous solutions. Physical treatments (i.e. thermal, mechanical, irradiation, ultrasound) work by destroying the cells through physical forces. This increases the contact area of the organics by reducing particle size, which facilitates microbial attack. Although physical pre-treatments are advantageous as no toxic compounds are produced, some techniques (e.g. thermal) can increase energy costs and thus become unprofitable. Chemical pretreatments (e.g. acid, alkali, organic solvents) work by breaking chemical bonds from complex structures, resulting in an internal increase in surface area by swelling the cell. However, they require special care as toxic compounds can form depending on the chemical reagents used. Biological pretreatments (i.e. fungi, bacteria, microbial consortia, enzymes) act in synergy with microbial metabolism and accelerate the degradation of organic matter. In this context, *Anacleto and colleagues* confirm that of the pretreatments commonly carried out in the textile industry, biological pretreatments contribute to higher biogas productivity through AD. Compared to chemical and physical pretreatments, enzymatic pretreatment can lead to an increase in methane yield of 360 % on average. Biological pretreatments also do not require the addition of chemicals and favor the reuse of textile wastewater, reducing the current need for clean water and promoting the circular economy in the textile industry. In addition, biological pretreatments are very efficient in removing highly soluble chemicals that are harmful to human and environmental health and given their lower energy requirements, the cost-benefit ratio is likely to be low. The introduction of pretreatment-enhanced biological waste treatment in the textile industry promotes proper management of the huge amounts of waste and transforms textile residues into economic value for the industry in line with the circular economy [22, 23].

## 5. Sustainability in the textile industry: Moving towards digitalisation and Industry 4.0

The digitalization of production processes has led to a significant shift in traditional industry towards new, sustainable business models. The introduction of digital technologies and tools in design and production has opened up new opportunities for customization, and the concept of Industry 4.0 enables an improved circularity in various sectors, including the textile industry. The concept of Industry 4.0 has led to virtualization, modernization and optimization of production and supply chains, allowing for more flexible production and personalization of products. Therefore, new technologies can help solve environmental problems caused by the traditional textile and fashion industry. *Bertola and Teunissen* carry out a detailed analysis of the impact of the Industry 4.0 concept on the textile and fashion industry. In their study, *Haponnen et al.* also come to similar conclusions about the impact of the Industry 4.0 concept on the textile industry. Through a comprehensive analysis of the literature and examples of best practices, they point out the compatibility of the Industry 4.0 paradigm in the context of the fashion industry, especially due to the characteristic of mass production for which the fashion industry is known worldwide. The current production model has a high negative impact on the environment and also on society. The move towards "smart production" and the use of innovative technologies are leading to greater

sustainability and efficiency. Traditional business models in the fashion industry were based on design, for which Industry 4.0 technologies can create intelligent networks. Digital technologies enable interaction between employees via platforms so that different fashion producers can easily share knowledge, which is considered a business model for local production. In addition, the transition to innovative, smart manufacturing is changing the textile industry system from a market-oriented to a ready-to-wear model, which also increases the interaction between companies and consumers [24, 25]. For sectors with massive production, such as the textile industry, the transition to a circular economy is extremely important. Incorporating the concept of Industry 4.0 into the textile industry implies a readiness for a rapid shift from primarily analog to digital technology and virtual trends. Due to the increasing innovation and efficiency resulting from digital hardware and software, the fundamental technologies and business models are being completely overturned throughout the industry, but especially in the textile industry.



**Figure 2.** Circular ecosystem business model for textiles [26]

In the textile and apparel industry, the application of these technological building blocks has meant revolutionary changes in terms of sustainability, energy and production efficiency: virtual fabrics and fashion design, digital printing, electronic machine control and e-commerce. Other Industry 4.0 factors have significantly changed the traditional textile industry: remote factory monitoring and maintenance, automated supply chains, virtual trade fairs and product showrooms, direct-to-consumer business model, Big Data utilization and machine learning, AR/VR, use of IoT (Internet of Things) in factories, additive manufacturing and cybersecurity [27].

## 6. Conclusion

By selecting eco-friendly materials, improving energy efficiency, reducing waste, and fostering ethical practices, textile manufacturers can contribute to a more sustainable and responsible industry, meeting the demands of today's conscious consumers and securing a

greener future for generations to come. Efforts to develop eco-design also enhance the chances to reuse and recycle the products and give them a second life.

## 7. Literature

- [1] 2022 Strategic Research and Innovation Agenda to Underpin the EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles, *Available at: <https://textile-platform.eu/news/the-public-version-of-our-2022-strategic-research-and-innovation-agenda-is-now-online>*
- [2] EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles, *Available at: [https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en)*
- [3] Bravo, C. V. Marco; Iturralde, P. M. William. Energy Efficiency in the Competitiveness of the Textile Industry // *Open Journal of Business and Management*, 10 (2022), 3; 1755-1767. (ISSN 2329-3292)
- [4] Demessinova, A. Aziza; Aidarova, Aina B.; Maulenkulova, Gulbana Erzhigitovna; & Mamutova, K. Katira. Energy Security of the Textile Industry // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 388 (2020); 142-147. (ISSN 0021-3497)
- [5] Kaniz, Farhana; Kumaran; Kadirgama; Abu, Shadate Faisal Mahamude; Mushfika, Tashim Mica. Energy consumption, environmental impact, and implementation of renewable energy resources in global textile industries: an overview towards circularity and sustainability // *Materials Circular Economy*, 4 (2022), 15; DOI 10.1007/s42824-022-00059-1
- [6] Khan, Irfan; Hou, Fujun; Zakari, Abdulrasheed & Tawiah, V. Konadu. The Dynamic Links among Energy Transitions, Energy Consumption, and Sustainable Economic Growth: A Novel Framework for IEA Countries // *Energy*, 222 (2021); DOI 10.1016/j.energy.2021.119935
- [7] Ministry of Economy and Sustainable Development, Energy in Croatia 2022, Annual Energy Review (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Energija u Hrvatskoj 2022, Godišnji energetske pregled), *Available at: <https://eihp.hr>* > Energija-u-HR-22\_WEB-novo
- [8] Jiménez-Marín, Glori,; Rodrigo Elías Zambrano; Araceli Galiano-Coronil; Rafael Ravina-Ripoll. Business and Energy Efficiency in the Age of Industry 4.0: The Hulten, Broweus and Van Dijk Sensory Marketing Model Applied to Spanish Textile Stores during the COVID-19 Crisis // *Energies* 14 (2021), 7; 1966. <https://doi.org/10.3390/en14071966>
- [9] Khude, Parkash. A Review on Energy Management in Textile Industry // *Innovative Energy & Research*, 6 (2017), 2; doi: 10.4172/2576-1463.1000169 (ISSN 257-1463)
- [10] Koc, Edem; Kaplan Emel. An investigation on energy consumption in yarn production with special reference to ring spinning // *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 15 (2007), 4; 18-25. (ISSN 1230-3666)
- [11] Faysal, Gm; Azad, Sonia; Repon, Reazuddin; Hossain, Tanjim. Sustainable yarn production using leftover fabric from apparel industries // *Heliyon*, 8 (2022), 11; (ISSN 2405-8440); doi: 10.1016/j.heliyon.2022. e11377



- [12] Pattanayak, Ajit Kumar. Sustainability in fabric manufacturing. In: Sustainable technologies for fashion and textiles / Rajkishore, Nayak (Ed.). Woodhead Publishing Series in Textiles, 2020. (ISBN: 978-0-08-102867-4)
- [13] Alkaya, Emrah; Demirer, Goksel N. Sustainable textile production: a case study from a woven fabric manufacturing mill in Turkey // *Journal of Cleaner Production*, 65 (2014); 595–603. (ISSN 0959-6526)
- [14] Nguyen, Thanh-Lam; Shu, Ming-Hung; Hsu, Bi-Min. Extended FMEA for sustainable manufacturing: an empirical study in the non-woven fabrics industry // *Sustainability*, 8 (2016), 9; doi.org/10.3390/su8090939 29.
- [15] Panda, Sanjay Kumar Bhikari Charan; Sen, Kushal; Mukhopadhyay, Samrat. Sustainable pretreatments in textile wet processing // *Journal of Cleaner Production*, 329 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129725>. (ISSN 0959-6526)
- [16] Lara, Livia; Cabral, Isabel; Cunha, Joana. Ecological approaches to textile dyeing: a review // *Sustainability*, 14 (2022), 14; <https://doi.org/10.3390/su14148353>. (ISSN 2071-1050)
- [17] Glogar, Martina; Ercegovic Razic, Sanja. Sustainable pre-treatment of cellulose knitwear in digital pigment printing processes // *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. (2024), <https://doi.org/10.1108/IJCST-03-2024-0061>. (ISSN: 0955-6222)
- [18] Besegatto, Stefane; Costa, Flavia Nunes; Damas, Mayra Stephanie Pascoal. Enzyme treatment at different stages of textile processing: A Review // *Industrial Biotechnology*, 14 (2018), 6; 298–307. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.0018> (ISSN 1931-8421).
- [19] Naqvi, Syeda Mehdiya; Bakhtir, Arfan; Manachandra, Manik. Energy audit of a textile company: A case study of finishing textile // *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 22 (2024) 3; 1040-1047. (ISSN 2581-9615)
- [20] Khandaker, Shahjalal; Bashar, Mahbulul; Islam, Aminul; Hossain, Tofazzal; Teo Siow Hwa; Awual, Rabiul. Sustainable energy generation from textile biowaste and its challenges: A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112051>. (ISSN 1879-0690)
- [21] Jeihanipour, Azam; Aslanzadeh, Solmaz; Rajendran, Karthik; Balasubramanian, Gopinath; Taherzadeh, Mohammad J. High-rate biogas production from waste textiles using a two-stage process // *Renewable Energy*, 52 (2013), 128-135. (ISSN 0960-1481)
- [22] Kumar, Pushpendar; Malik, Anushree; Samuchiwal, Saurabh. Anaerobic digestion of textile industries wastes for biogas production // *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10 (2020), 3; 715-724. (ISSN 21906815)
- [23] Anacleto, Thuane Mendes; Suzuki-Kozlowsky, Betina; Wilson, Alan E.; Enrich-Prast, Alex. Comprehensive Meta-Analysis of Pathways to Increase Biogas Production in the Textile Industry // *Energies*, 15 (2022), 15; <https://doi.org/10.3390/en15155574>. (ISSN 1996-1073)

- [24] Bertola, Paola; Teunissen, Jose. Fashion 4.0. Innovating fashion industry through digital transformation // *Research Journal of Textile and Apparel*, 22 (2018), 4; 352-369 (ISSN 1560-6074).
- [25] Ghoreishi, Malahat; Happonen, Ari; Pynnönen, Mikko. Exploring Industry 4.0 Technologies to Enhance Circularity in Textile Industry: Role of Internet of Things // *Proceedings of 21<sup>st</sup> International Working Seminar on Production Economics* / Attila Chikán (Ed.). Innsbruck, Austria, 24.-28.02.2020., doi: 10.5281/zenodo.3471421
- [26] Fontell, Paula; Heikkila, Pirjo. Model of Circular Business Ecosystem for Textiles, 2017. Available at: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2017/T313.pdf>.
- [27] Ready to Transform, *A Strategic Research and Innovation Agenda to underpin the EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles 2022*, May 2022. European Technology Platform, Available at: <https://textile-platform.eu/news/the-public-version-of-our-2022-strategic-research-and-innovation-agenda-is-now-online>



## **Razvoj modula za priključivanje dizalice topline na sustav podnog grijanja**

### ***Development of a module to integrate the heat pump and the underfloor heating system***

**M. Lovrić<sup>1</sup>, E. Kamenar<sup>1</sup>, V. Prokop<sup>2</sup>, V. Glažar<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, Hrvatska

<sup>2</sup>Frigosan d.o.o., Obitelji Duiz 2, Rijeka

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [vladimir.glazar@riteh.uniri.hr](mailto:vladimir.glazar@riteh.uniri.hr)

#### **Sažetak**

U radu je prikazana primjena reverzibilnog (povratnog) inženjerstva s ciljem razvoja i izrade modula za potrebe brzog priključenja i integracije dizalice topline u postojeći sustav podnog grijanja stambenog prostora. Modul je razvijen u suradnji s tvrtkom Frigosan d.o.o. iz Rijeke te bi trebao pojednostaviti i ubrzati proces spajanja svih komponenti u jedinstveni sustav grijanja. Upotrebom računalnog programa za izradu 3D parametarskih modela, te programa za 3D ispis izrađen je g-kod potreban za izradu modula na 3D pisaču. Prototip modula koji mora omogućiti spajanje, zamjenu dijelova, te regulaciju i kontrolu sustava je izrađen pomoću FDM (en. Fused Deposition Modeling) tehnologije iz ABS polimera. U radu su opisane metode korištene za izradu, te cijeli postupak razvoja od prvog prototipa do finalnog proizvoda s kojim je izvršeno spajanje dizalice topline u split izvedbi na postojeći sustav podnog grijanja. Razvijeni modul je dodatno prilagođen te pripremljen za izradu pomoću metode injekcijskog prešanja kako bi se omogućila proizvodnja modula u većim količinama iz materijala koji može zadovoljiti kvalitetan i dugotrajan rad sustava.

**Ključne riječi:** reverzibilno inženjerstvo, aditivne tehnologije, izrada prototipa, dizalica topline, sustav grijanja

#### **Abstract**

The application of reversible engineering for module development is presented in this paper. The purpose of this investigation is the ease of installation and rapid integration of heat pumps in an existing underfloor heating system using the developed module. The module was designed in cooperation with the company Frigosan d.o.o. from Rijeka. The module should facilitate and speed up the connection of all system components into a single heating system. Using the computer program for the creation of parametric 3D models, compute applications for 3D printing, a prototype was designed and prepared for production on a 3D printer. The module prototype, which must enable connection, quick replacement of parts, and regulation and control of the system, was made using FDM (en. Fused Deposition

Modeling) technology from ABS polymer. The work describes the manufacturing methods used, as well as the entire development process from the prototype to the resulting module. The developed module was additionally adapted and prepared for production using the injection moulding method to enable the production of modules in larger quantities from materials that can satisfy the high-quality and long-term operation of the system.

**Key words:** Reversible Engineering, Additive Technologies, Prototype Development, Air-Water Heat Pumps, Heating System

## 1. Uvod

### 1.1. Aditivne tehnologije

Znanstvena i umjetnička područja koja se bave dizajnom u posljednjim godinama doživjela su velike promjene zahvaljujući napretku tehnologija koja omogućuje inovativne pristupe koji uz pojednostavljenja i brži postupak, donose značajne uštede u odnosu na prethodne postupke razvoja proizvoda [1]. To se posebno odnosi na strojarstvo, u kontekstu ovoga rada konkretno na sustave grijanja, hlađenja i ventilacije (en. Heating, Ventilation and Air Conditioning, akronim HVAC) [2] te na razvoj industrijskog dizajna povezanog sa Industrijom 4.0 (en. Industry 4.0) [3]. Mogućnost jednostavne i brze izrade vrlo složenih oblika potpuno prilagođenih pojedinom proizvodu koju aditivne tehnologije omogućuju revolucionizirala je načine na koji se dolazi do novih proizvoda [4]. Razvoju aditivnih tehnologija doprinijeli su trendovi razvoja novih proizvoda. Vijek trajanja proizvoda na tržištu je sve kraći, a potreba za sve većim brojem različitih proizvoda raste. Aditivne tehnologije upravo to omogućavaju, te su se u zadnjih 10-tak godina na tržištu pojavile razne verzije 3D pisača prilagođenih svim cjenovnim razredima te zahtjevima koje proizvođači postavljaju tvorcima 3D pisača kako bi se željeni proizvodi izradili iz odabranog materijala tražene kvalitete [5]. U komercijalnoj upotrebi se danas sreću sljedeće metode brze izrade prototipa: stereolitografija (en. Stereolithography, SLA), selektivno lasersko sinteriranje (en. Selective Laser Sintering, SLS), proizvodnja objekata lameliranjem (en. Laminated Object Manufacturing, LOM), modeliranje spajanjem rastopljenom naslagom (en. Fused Deposition Modelling, FDM), stvrdnjavanje u čvrstoj bazi (en. Solid Ground Curing, SGC), tehnike ispisivanja tintnim pisačem (en. Ink Jet Printing Techniques) i druge [6].

Aditivnim tehnologijama se stvaraju trodimenzionalni objekti metodom sloj po sloj. Svaki sljedeći sloj se veže za prethodni sloj koji može biti otopljeni ili djelomično otopljeni materijal. Za izradu dijelova najčešće se upotrebljavaju polimerni materijali kao što su akrilonitril/butadien/stiren (akronim: ABS), poliamid (akronim: PA), polikarbonat (akronim: PC), polyactic acid (akronim: PLA), epoksidne smole i slično, te keramika, čelik, aluminij, titanij i druge lake slitine [7].

Objekti koji se žele proizvesti ovim tehnologijama su prethodno digitalno definirani, odnosno izrađeni pomoću CAD (en. Computer Aided Design) softvera za izradu .stl datoteka koje omogućavaju dijeljenje objekta u iznimno tanke slojeve pomoću dodatnih programa za obradu modela (en. Slicer). Takav program se koristi za izradu koda koji se unosi u 3D pisač te omogućava vođenje mlaznice ili glave pisača po točno određenom putu uz precizno

doziranje dodavanja materijala na prethodni sloj. Ukoliko se koristi laser ili elektronski snop, postupak se sastoji od selektivnog topljenja praškastog materijala, koji se prilikom hlađenja i dodavanja novog sloja praha topi i spaja, te na taj način tvori trodimenzionalnu strukturu [8]. Prednost korištenja aditivnih tehnologija u odnosu na klasične postupke strojne obrade materijala predstavlja stvaranje manje otpadnog materijala te mogućnost izrade složene geometrije (Slika 1.) koja bi korištenjem tradicionalnih postupaka oduzela previše vremena uz veliki porast troškova izrade. Ušteda vremena je značajna jer metoda ne zahtjeva procese pripreme stroja, učvršćenja sirovog komada i obrade, već se proizvodi izrađuju direktno iz 3D modela, što konstruktorima omogućava i veću slobodu dizajniranja komponenti. Dijelovi koji su prethodno trebali biti izrađeni pojedinačno, te naknadno zahtijevali sastavljanje, zavarivanje i slično, mogu se izrađivati iz jednog komada. Najveći utjecajni faktor je smanjenje težine proizvoda. Korištenjem metoda za analizu konstrukcije, te različite segmentne ili rešetkaste strukture, mogu se napraviti složena olakšanja uz zadržavanje željene čvrstoće i cjelovitosti dijela [9].



**Slika 1.** Poboljšani izmjenjivači topline izrađeni aditivnim tehnologijama [10]

## 1.2. Dizalice topline

Prema podacima Eurostat-a oko 50% sve potrošene energije u EU koristi se za grijanje i hlađenje sa udjelom fosilnih goriva većim od 70%. U stambenom sektoru približno 80% ukupno utrošene energije je upotrijebljeno za grijanje prostora i potrošne tople vode [11]. Dizalice topline, središnja su tehnologija u globalnom prijelazu na sigurno i održivo grijanje [12]. Dizalice topline su dio sustava grijanja i/ili hlađenja stambenih objekata, koji se ugrađuje izvan grijanog/hlađenog objekta te rade na principu sličnom kao i rashladni uređaji [13]. Dizalice topline mogu koristiti unutarnju toplinu zemlje (geotermalnu energiju), odnosno prenositi toplinu između nekog prostora i tla ili koristiti toplinu iz zraka, odnosno prenositi toplinu između unutrašnjeg i vanjskog zraka. Dizalice topline su pogonjene električnom energijom, te ih to čini dobrim za okoliš u slučaju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije [14]. Dizalice topline ne proizvode toplinu, već koriste određene komponente za njenu distribuciju. Osnovne komponente sustava su vanjska i unutarnja jedinica. Vanjska jedinica se sastoji od izmjenjivača topline koji može služiti kao kondenzator prilikom hlađenja ili kao isparivač prilikom grijanja i ventilatora koji pospješuje izmjenu topline. Unutarnja jedinica se također sastoji od izmjenjivača i ventilatora, ali se izmjenjivač

prilikom hlađenja ponaša kao isparivač, a prilikom grijanja kao kondenzator. Sustav koristi rashladni medij pomoću kojega se izmjenjuje toplina kroz cijeli sustav. Za cirkulaciju rashladnog sredstva koristi se kompresor, te četveroputni ventil i termo-ekspanzijski ventili. Četveroputni ventil omogućava rad sustava u suprotnom smjeru, odnosno prelazak između grijanja i hlađenja unutarnjeg prostora, dok termo-ekspanzijski ventil omogućava regulaciju tlaka i temperature rashladnog medija.

U ovom radu opisan je postupak razvoja modula za potrebe brzog priključenja i integracije postojećeg sustava podnog grijanja sa novom dizalicom topline zrak-voda u split izvedbi. Modul je izrađen primjenom reverzibilnog inženjerstva po uzoru na postojeći sličan modul koji zbog neodgovarajućih karakteristika nije bilo moguće ugraditi u sustav. Modul ima mogućnost mjerenja polazne i povratne temperature vode te mogućnost mjerenja tlaka u sustavu. Dodatno, modul uključuje ručne ventile za kontrolu protoka u pojedinom krugu, te pumpu kojom se ostvaruje protok radnog medija. Glavni cilj bio je razvoj prototipa koji bi se izrađivao postupkom 3D ispisa, dok se razmatrala i mogućnost proizvodnje pomoću injekcijskog prešanja u slučaju potrebe za proizvodnju većih serija proizvoda. U dogovoru s tvrtkom Frigosan d.o.o iz Rijeke, bilo je potrebno razviti konstrukcijsko rješenje koje bi omogućilo jednostavniju i bržu implementaciju sustava grijanja u kućanstvu, te mjerenje karakterističnih veličina za sustav grijanja.

## 2. Predmet razmatranja

Na slici 2a je prikazan originalan razdjelno/sabirni ormarić sa ugrađenim hidrauličkim modulom koji se koristi za povezivanje dizalice topline i postojećeg sustava grijanja. Vrijeme sastavljanja takvog sklopa je relativno dugo, ali najveća mana je što ne omogućava brzu zamjenu pojedinih dijelova. Iz tog razloga stvorila se potreba za rješenjem koje će imati mogućnost zatvaranja dovodne i odvodne grane što je neophodno za izmjenu pojedinog dijela sustava bez potrebe za zaustavljanjem rada cijelog sustava, odnosno pražnjenja sustava. Uređaj takvih karakteristika koje bi zadovoljile sve postavljene zahtjeve nije pronađen na tržištu.



(a)



(b)

**Slika 2.** Originalni sustav za integraciju dizalice topline (a) i hidraulički modul (b)



Kao početna točka za izradu novog modula korišten je proizvod koji već postoji na tržištu (slika 2b), ali koji nije bio adekvatan za primjenu u ovom slučaju zbog neodgovarajućih dimenzija te većeg broja nepotrebnih priključaka. Pristupilo se mjerenju i analizi modula kao početnoj točki postupka reverzibilnog (povratnog) inženjerstva. Reverzibilno inženjerstvo je proces ili metoda otkrivanja potpunog razumijevanja izrađenog uređaja, proizvoda, sustava, programskog koda i sl. kroz njegovu potpunu analizu. U inženjerstvu se kao glavna metoda koristi dedukcija, odnosno posredno zaključivanje od općeg, originalnog objekta s ciljem njegovog popravka, ili jednostavno do stvaranja novog ili sličnog razumijevanjem pojedinih njegovih karakteristika [15]. Cilj je izrada varijantne konstrukcije, prema modelu, te njegovim rastavljanjem na pojedine komponente, moglo se pristupiti mjerenju konkretnih dimenzija. Princip rada ostaje isti kao i na komercijalnom modulu. Glavni zahtjevi postavljeni za izradu novog modula su: omogućiti jednostavniju i bržu implementaciju sustava grijanja u kućanstvu, te mjerenje karakterističnih veličina. Modul ima mogućnost mjerenja polazne i povratne temperature vode te mogućnosti mjerenja tlaka. Također, sadrži ručne ventile za otvaranje i zatvaranje protoka, te crpku kojom se ostvaruje protok radnog medija. Komercijalni modul sadrži velik broj dodatnih priključaka za veće sustave grijanja koji su se u ovom trenutku pokazali kao nepotrebni.

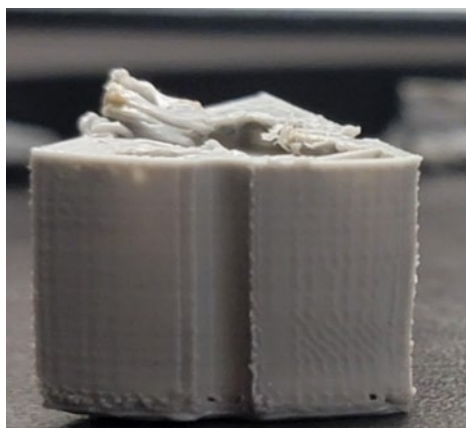
### 3. Opis korištene opreme

#### 3.1. Računalni programi za izradu 3D modela

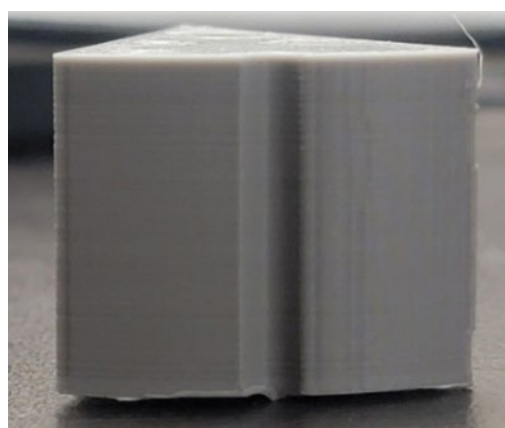
Prilikom razvoja modula korišteni su računalni paketi za izradu parametarskih modela i dva FDM 3D pisača. 3D model izrađen je korištenjem računalnog programa SolidWorks. SolidWorks je računalni program koji se koristi na sustavu Microsoft Windows, a predstavlja računalno potpomognuti dizajn i inženjering (en. Computer Aided Design, akronim CAD). Prilikom izrade prvog prototipa korišten je program Autodesk Inventor, ali je proces izrade 3D modela bio dugotrajan. Zbog toga je za izradu modula odabran SolidWorks, koji je u ovoj situaciji omogućio, a što i zbog prethodnog iskustva korisnika, nešto bržu izradu 3D modela.

#### 3.2. Računalni programi za izradu g-koda

Sljedeći korišteni program je Ultimaker CURA. Program za uvoz zahtjeva .stl format datoteke koji se izrađuje prilikom spremanja modela u SolidWorks-u. CURA je softverski program otvorenog koda koji dobiveni model reže u puno slojeva i omogućava izradu g-koda koji je potreban 3D pisačima za rad [16]. Program je intuitivan i jednostavan za korištenje. Dodatno, za izradu g-koda kod prvog prototipa korišten je program Creality Slicer [17] koji je preporučan od strane proizvođača jednog od korištenog 3D pisača. Na slici 3 se može vidjeti usporedba kvalitete ispisa korištenjem oba programa sa jednakim postavkama.



(a)



(b)

**Slika 3.** Uzorci za koje je g-kod izrađen u Creality Slicer-a (a) i Ultimaker CURA-i (b)

Oba programa izrađuju različiti g-kod za isti model, te se prilikom testiranja i izrade prvog prototipa mogla uočiti razlika u kvaliteti ispisa finalnog proizvoda. Okrugle plohe su bolje izrađene korištenjem programa Ultimaker CURA, uz istovremeno potrebno manje vrijeme za njihovu izradu. Kvaliteta finalnog proizvoda je bolja, te je manji udio ispisanih dijelova sa greškama. Osnovne postavke ispisa su prikazane u tablici 1.

**Tablica 1.** Postavke ispisa

Temperatura taljenja: $t_m$	220°C
Temperatura podloge: $t_s$	60°C (20°C)
Ispuna modela	100%
Brzina ispisa: $v$	50 mm/s
Kut potpora (engl. <i>support angle</i> ):	80°

### 3.3. 3D pisači

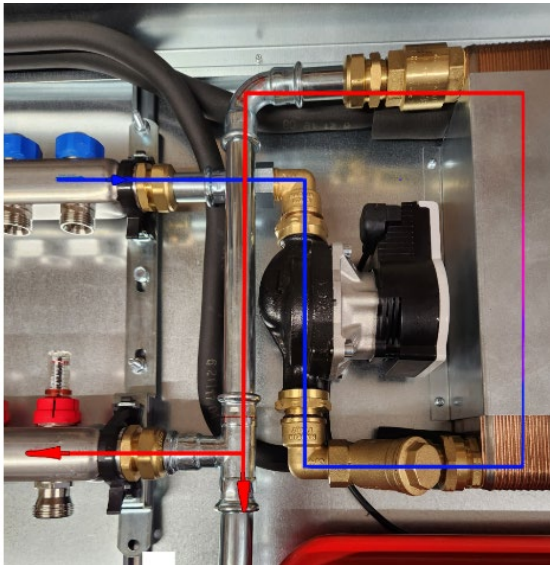
Za izradu fizičkog modela prvo je korišten FDM 3D pisač Ender 3 proizvođača Creality. Ender 3 predstavlja hobi printer koji omogućava visoko precizni ispis dijelova. Maksimalne dimenzije za 3D printanje su 220 x 220 x 250 mm. Korišteni pisač omogućava ispis dijelova sa različitim materijalima zbog visoke temperature zagrijavanja. Također, za izradu prototipa korišten je FDM pisač Flashprint Creator 3 namijenjen za industrijsku primjenu. To je 3D pisač koji ima zatvorenu radnu komoru te maksimalne dimenzije za 3D ispis su 300 x 250 x 200 mm, što mu omogućava ispis dijelova većih dimenzija nego pisač Ender 3. Pisač koristi vlastiti softver zvan Flashforge 5 koji izrađuje g-kod na drugačiji način od CURA programa, te se može vidjeti razlika u kvaliteti ispisa. Na navedeni printer jače djeluju vibracije, što se moglo primijetiti na pojedinim slojevima prilikom ispisa. Oprema prikazana u ovom poglavlju korištena je za izradu prototipa čiji je razvoj objašnjen u sljedećem poglavlju.



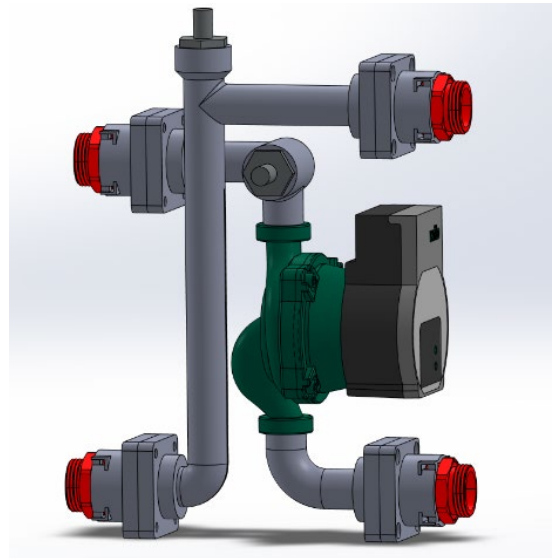
## 4. Razvoj modula za integraciju dizalice topline

### 4.1. Izrada 3D modela

Na slici 4a je prikazan postojeći sustav sa tri osnovne komponente potrebne za izradu novog modula. To su dovodna i odvodna grana s lijeve strane, pumpa i cjevovod u sredini, te pločasti izmjenjivač topline s desne strane. Plavom bojom je prikazan smjer kretanja radnog fluida od povratnog kolektora prema pumpi i izmjenjivaču topline. Crvenom bojom su prikazani priključci prema polaznom kolektoru te spoj na ekspanzijsku posudu.



(a)

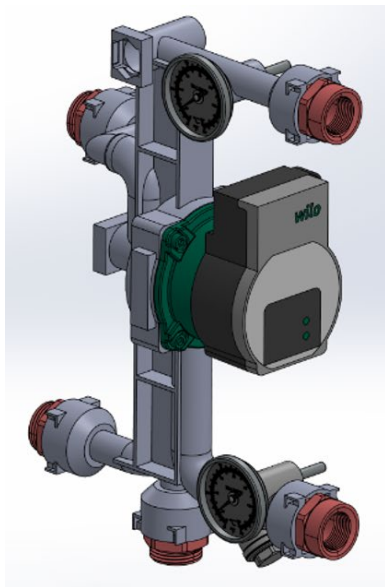


(b)

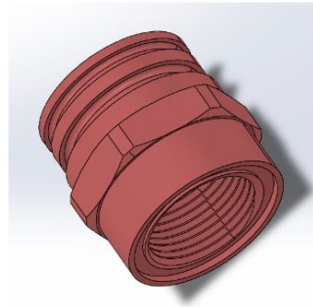
**Slika 4.** Postojeći sustav sa ucrtanim kretanjem fluida (a) i 3D model prototipa #1 (b)

Prvi razvijeni model prikazan na slici 4b daje osnovnu sliku sustava u kojemu su integrirani dijelovi potrebni za rad. Usporedbom sa postojećim sustavom mogu se uočiti principijelne sličnosti. Prototip #1 ne nalikuje nabavljenom komercijalnom modulu, ali je poslužio za određivanje točnog položaja određenih komponenti (pozicije zapornih ventila i priključaka prototipa).

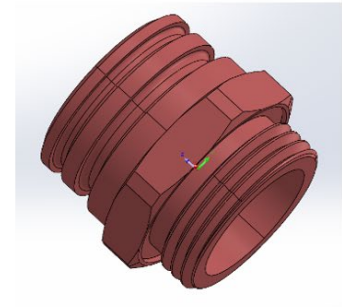
Prototip #2 (Slika 5a), izgleda slično komercijalnom modulu prikazanom na slici 2b, je sljedeći izrađen. Uočene pogreške na prototipu #1 su ispravljene prilikom modeliranja. Izvršena je rotacija gornjeg ventila za 90° suprotno od kazaljke na satu zbog lakše demontaže. Postojeće prirubnice su pojednostavljene i zamijenjene sa spojnicama prikazanim na slici 5b iz razloga što traženi modul ne treba imati mogućnost promjene položaja. Također, kako model treba biti izrađen kao kompaktna cjelina, izvedena su potrebna ojačanja u vidu rebara koja će povezivati obje grane. Na odvodnu granu je postavljen otvor za fleksibilnu cijev koja se spaja na ekspanzijsku posudu spojnicom (Slika 5c) te je dodan filter na izlazu iz pumpe.



(a)



(b)



(c)

**Slika 5.** 3D model prototipa #2 (a), spojnica dovodnog i odvodnog priključka (b) te spojnica izmjenjivača topline (c)

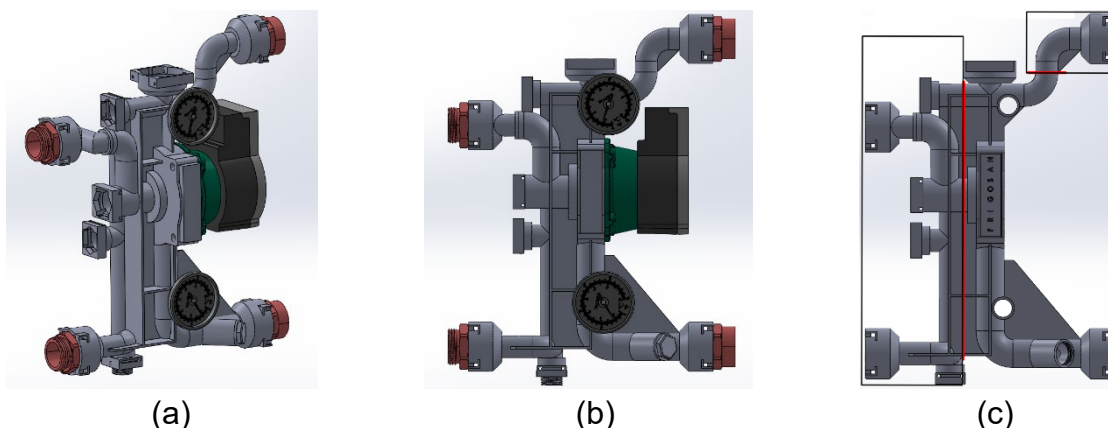
Unatoč znatnim unaprjeđenjima Prototipa #2, pojavili su se novi zahtjevi koje je trebalo uključiti u model: rotirati u lijevo za 90° gornji ventil koji zatvara odvodnu cijev kako bi svi otvori bili paralelni, promjena dimenzije priključka za elastičnu cijev na 1/2" zbog ograničenog prostora, postavljenje ventila za odzračivanje na dovodnu cijev, dodavanje priključka od 1/2" na odvodnu cijev zbog ugradnje dodatnog manometra, rotacija filtra za 90° oko osi cijevi zbog jednostavnijeg održavanja, prebacivanje donjeg termometra ulijevo kako ne bi smetao prilikom spajanja u sustav, povećanje prostora za etiketu sa nazivom proizvođača, ugradnja uronske cijevi (korištena postojeća od termometra), i ugradnja dodatnih bočnih rebra za osiguranje cijevi.

#### 4.2. Injekcijsko prešanje

Prvotna zamisao pri postavljanju zadatka u suradnji sa tvrtkom Frigosan d.o.o. je bila razvoj prototipa te izrada kompletnog modula metodom injekcijskog prešanja (en. Injection Moulding). Injekcijsko prešanje je ciklički postupak pretvorbe polimera njegovim ubrizgavanjem u temperiranu kalupnu šupljinu [18] koja se koristi za proizvodnju u velikim serijama pri čemu najviše vremena i sredstava otpada na izradu kalupa. Kako ova metoda nije prikladna za pojedinačnu proizvodnju, od nje se odustalo te je nastavak razvoja prototipa usmjeren na ispis na 3D pisaču.

#### 4.3. 3D model prototipa

Prototip #3 prikazan na slikama 6a i 6b predstavlja rješenje koje zadovoljava sve postavljene zahtjeve.

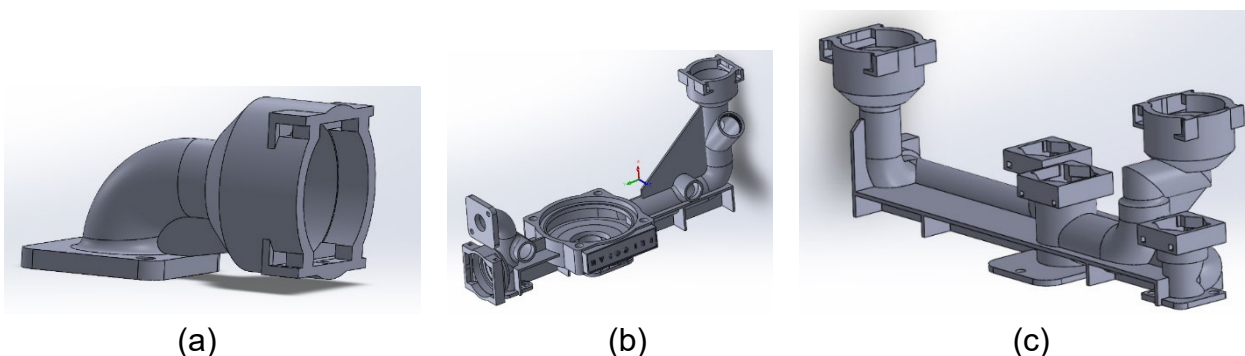


**Slika 6.** 3D model prototipa #3(a), pogled sprijeda na prototip #3(b) i podjela 3D modela na tri dijela gdje crvene linije predstavljaju linije spajanja/razdvajanja(c)

Ukoliko bi se model pokušao ispisati iz jednog komada, stvorila bi se potreba za posebnim alatima kako bi se izradile unutarnje potporne strukture (engl. Supports). Zbog toga i dostupne veličine radnog stola na printeru, model je podijeljen na tri djela što je prikazano na slici 6c gdje crvene linije predstavljaju linije spajanja/razdvajanja. Dio modela označen sivom bojom na slikama 6a i 6b je izrađen na printeru FlashForge Creator 3. Dijelovi označeni crvenom bojom (Slika 6a i 6b), te čepovi i slično su izrađeni na printeru Ender 3. Postavke ispisa su jednake na oba printera, jedina razlika je u vrsti potpornih struktura. Primijenjena je preporučena temperatura taljenja filameta za korišteni materijal (PLA polimer proizvođača AzureFilm) od 200°C – 230°C na mlaznici i 20°C – 60°C za temperaturu podloge. Prilikom ispisa na FlashForge printeru korištena je temperatura podloge od 20°C jer printer ima zatvorenu komoru za ispis, te nije potrebna povišena temperatura kako bi se izbjeglo podizanje prvih slojeva (en. Warping), već je dovoljna primjena ljepenke. Ljepilo se kao aerosol nanosi na alkoholom očišćenu hladnu površinu.

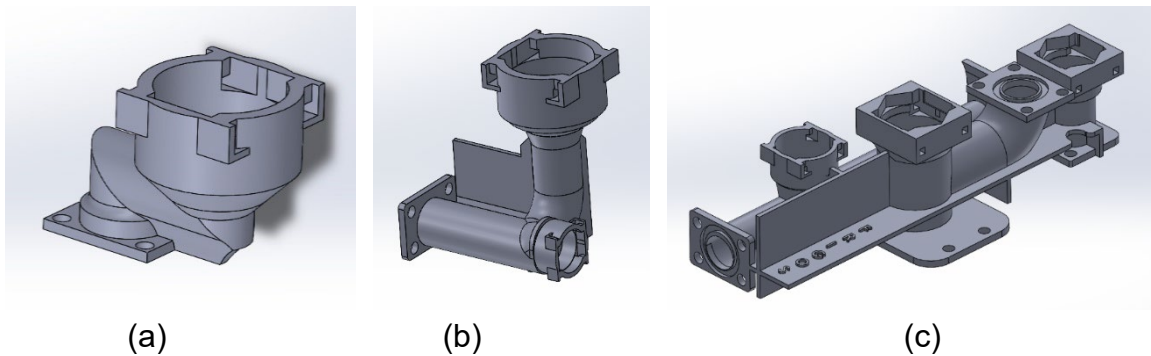
#### 4.4. Ispis modela na 3D printeru

Nakon generiranja g-koda, putem vanjske memorije, g-kod se prebacuje na printer. Prije svake upotrebe printera, potrebno je napraviti kalibriranje podloge pred zagrijavanje. Na slici 7 je prikazan 3D model prototipa #3 podijeljen na tri dijela zbog lakšeg ispisa.



**Slika 7.** 3D model prototipa #3 podijeljen na tri dijela (a – spoj na izmjenjivač topline, b – središnji dio sa nosačem pumpe, c – spoj na razdjelni/sabirni kolektor sustava grijanja)

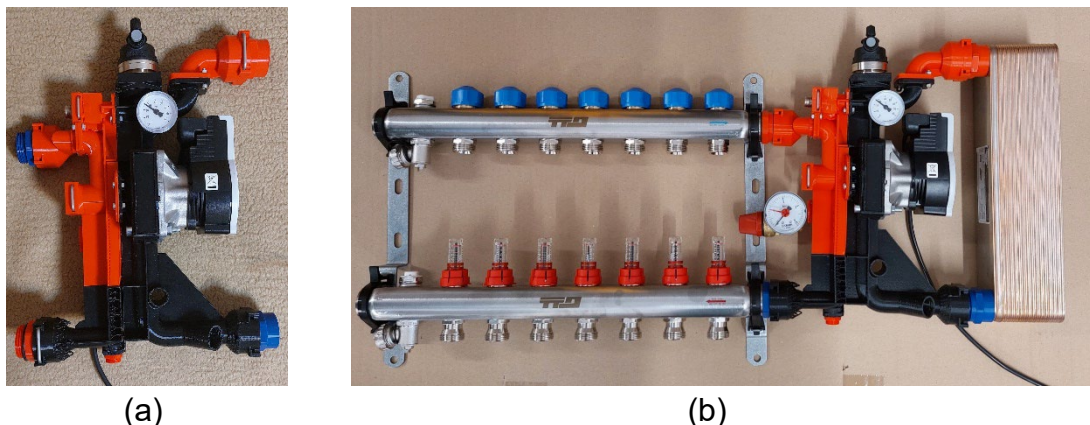
Nakon podešavanja parametra ispisa, odnosno debljine potpora (en. Support), moglo se pristupiti ispisu. Kroz postupak 3D ispisa pojavilo se mnogo problema koji su uspješno riješeni: potpore nedovoljne širine koje su zbog vibracija uzrokovanih kretanjem glave pisača pucale – povećana je njihova širina te gustoća, unutarnje stijenke cijevi nedovoljne površinske hrapavosti – isključena primjena potpora za te dijelove, 3D print mrežastog izgleda i pucanje materijala – filament zamijenjen sa novim (PLA polimer proizvođača PolyLitePLA), razdvajanje površinskih slojeva – svi oštri prijelazi su napravljeni s blagim radijusom, pucanje grane modula sa spojevima prema razdjelniku/sabirniku sustava grijanja – izrađena podjela na dodatna tri dijela (slika 8).



**Slika 7.** 3D model prototipa #3 podijeljen na dodatna tri dijela (a i b – spojevi na izmjenjivač topline, b – središnji dio za ugradnju mjerene armature)

#### 4.5. Montaža i ugradnja modula

Nakon izrade svih komponenti modela te čišćenja potpora i brušenja spojnih dijelova, moglo se pristupiti spajanju. Pri 3D ispisu rastavljeni dijelovi su spojeni prirubnicama osiguranim vijcima, te su pri spajanju primijenjene odgovarajuće brtve kako bi se onemogućilo curenje radnog medija. Na slici 8a je prikazan završni modul za integraciju dizalice topline sa ugrađenom pumpom i mjernom armaturom.



**Slika 8.** Modul za integraciju dizalice topline (a) i modul spojen na razdjelnik/sabirnik sustava grijanja te izmjenjivač topline na strani dizalice topline (b)

## 5. Zaključak

U ovom radu prikazan je postupak izrade modula za potrebe brzog priključenja i integracije dizalice topline u postojeći sustav podnog grijanja stambenog prostora. Prilagodбом postojećeg sustava radu sa dizalicom topline, u slučaju da je pogonjena električnom energijom nastalom iz obnovljivih izvora energije, smanjuju se emisije stakleničkih plinova čime se direktno doprinosi dekarbonizaciji u području zgradarstva.

Metodom reverzibilnog (povratnog) inženjerstva, na temelju nabavljenog modula na tržištu, a koji se pokazao kao neadekvatan za primjenu u ovom slučaju, razvijen je novi proizvod. Razvijeni modul se koristi u sustavu grijanja ogrjevnog medija za potrebe sustava podnog grijanja. Dizajniranjem i izradom 3D modela dobiveno je rješenje koje je u potpunosti izrađeno metodom 3D ispisa. Aditivne tehnologije predstavljaju jednu od danas najkorištenijih metoda za brzu izradu prototipa pri čemu omogućavaju korištenje raznih materijala. Metoda 3D ispisa znatno olakšava uključivanje podsustava složenih geometrijskih izvedbi u samom postupku izrade prototipa bez potrebe za skupim promjenama proizvodnih procesa. Priključni spojevi, distribucijski kanali, složeni obrasci i/ili teksture površina koje se pojavljuju na unutarnjim stjenkama značajno povećavaju trošak proizvodnje ukoliko se koristi konvencionalne tehnike koje se u znatnoj mjeri oslanjaju na standardizaciju proizvodnje.

U nastavku istraživanja, razvoj modula za priključivanje dizalice topline u sustav grijanja bi tekao u dva smjera. U prvome bi se posebna pozornost posvetila ispisu prototipa na naprednijem 3D printeru uz korištenje materijala koji bi omogućili veću otpornost na temperature i više tlakove. U drugome smjeru, u slučaju potrebe za većim serijama proizvoda, razvijeni 3D model bi se upotrijebio za izradu kalupa za injekcijsko prešanje. Rezultati oba istraživanja bi omogućila početak postupka dobivanja certifikata potrebnog da se proizvod stavi na tržište od strane nadležnog tijela.

## 6. Literatura

- [1] Dhir, A.; Talwar, S.; Alghafes, R.; Badhish, S. Different strokes for different folks: Comparative analysis of 3D printing in large, medium and small firms // *Technovation*, 125 (2023), 102792. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102792>
- [2] Bedarf, P.; Dutto, A.; Zanini, M.; Dillenburger, B. Foam 3D printing for construction: A review of applications, materials, and processes // *Automation in Construction*, 130 (2021), 103861. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103861>
- [3] Cuellar, S.; Grisales, S.; Castaneda, D. I. Constructing tomorrow: A multifaceted exploration of Industry 4.0 scientific, patents, and market trend // *Automation in Construction*, 156 (2023) 105113. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105113>
- [4] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Kai, C. C. *Rapid Prototyping Principles and Applications in Manufacturing*, World Scientific, 2010. (ISBN: 978-981-277-897-0)
- [5] Puvača, S.: *Povezivanje podataka 3D CAD modela s tehnologijom brze izrade prototipa*, završni rad, Sveučilište u Rijeci, 2015.

- [6] Jandyal, A.; Chaturvedi, I.; Wazir, I.; Raina, A.; Irfan, M.; Haq, U. 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0 // *Sustainable Operations and Computers*, 3 (2022); 33-42. (<https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>)
- [7] Enciklopedija: Aditivna proizvodnja, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/aditivna-proizvodnja>, (accessed on 24th of June, 2024)
- [8] Kamrani, K. K.; Nasr, E. A. *Engineering Design and Rapid Prototyping*, Springer, 2014. (ISBN: 978-1489989918)
- [9] [https://www.colibriumadditive.com/sites/default/files/41222\\_GEA\\_Corp\\_Brochure\\_8.5x11\\_Digital.pdf](https://www.colibriumadditive.com/sites/default/files/41222_GEA_Corp_Brochure_8.5x11_Digital.pdf) (accessed on 22nd of June, 2024)
- [10] <https://www.colibriumadditive.com/news/metal-3d-printing-now-were-shooting-it-space> (accessed on 24th of June, 2024)
- [11] European Commission, Directive of the European Parliament and of the Council on Energy Efficiency (Recast), Brussels, 2021.
- [12] International Energy Agency (IAE), *The Future of Heat Pumps*, IEA Publications, 2022.
- [13] <http://hr.rhongmachines.net/info/differences-between-chillers-and-heat-pumps-79235678.html>, (accessed on 24th of June, 2024)
- [14] <https://regulator.hr/savjeti/sto-su-dizalice-topline-kako-rade/>, (accessed on 24th of June, 2024)
- [15] Dullen, S; Verma, D.; Blackburn, M. Review of Research into the Nature of Engineering and Development Rework: Need for a Systems Engineering Framework for Enabling Rapid Prototyping and Rapid Fielding // *Procedia Computer Science*, 153 (2019); 118-125.
- [16] UltiMaker Cura, <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>, (accessed on 24th of June, 2024)
- [17] Creality ender, <https://www.creality.com/products/ender-3-v2-3d-printer-csco>, (accessed on 24th of June, 2024)
- [18] Rajeshkumar, G.; S. A. Seshadri; Devnani, G.L.; Sanjay, M.R.; Siengchin, S.; Maran, J.P.; Al-Dhabi, N. A.; Karuppiyah, P.; Mariadhas, V. A.; Sivarajasekar, N., Anuf, R. Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review // *Journal of Cleaner Production*, 310 (2021) 127483. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127483>



# Održavanje sustava javne odvodnje: čišćenje cijevi, inspekcija i CCTV pregled

## *Maintenance of Public Drainage Systems: Pipe Cleaning, Inspection and CCTV Inspection*

D. Obradović<sup>1,\*</sup>, M. Mesaroš<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Osijek, Hrvatska

<sup>2</sup>Heureka, mjernoistraživački laboratorij za vodovod i kanalizaciju, Tenja, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [dobradovic@gfos.hr](mailto:dobradovic@gfos.hr)

### Sažetak

Sustav javne odvodnje obuhvaća niz objekata i uređaja čija namjena je prikupljanje, transport, pročišćavanje te, na kraju, ispuštanje otpadnih voda u recipijent te je isti vrlo važan u očuvanju zdravlja stanovništva. Međutim, kako bi svaka građevina mogla ispunjavati svoju namjenu i zahtjeve korisnika te bila prikladna za uporabu neophodno je njeno pravilno i pravovremeno održavanje. Isto vrijedi i za sustav javne odvodnje čije održavanje se počesto ne izvodi u mjeri kako je potrebno. Važan dio sustava javne odvodnje su i cijevi koje se nalaze pod zemljom te je samim time njihovo održavanje dosta otežano. Neke od aktivnosti održavanja kanalizacijskih cijevi su ispiranje (čišćenje) i vizualni pregled pomoću CCTV inspekcije. Redovitim čišćenjem prema definiranom planu uklanjaju se sedimenti iz cijevi. Čišćenje se može provoditi mehaničkim sredstvima i strojevima za čišćenje te se, također, može raditi čišćenje ispiranjem vodom pod velikim pritiskom. Snimanje kamerama koje su posebno dizajnirane za kanalizacijske cijevi naziva se CCTV inspekcija. Kontrola ispravnosti, koja se dokazuje CCTV inspekcijom, provodi se na svojstvo strukturalne stabilnosti i funkcionalnosti prema rokovima koji su propisani. U radu će se navesti određeni pravni propisi i norme koje je neophodno poznavati kod aktivnosti održavanja sustava javne odvodnje. Kratko će se prikazati metode čišćenja cijevi, svrdla za stroj za čišćenje kanalizacije, provođenje CCTV inspekcije, kao i navesti metode pregleda i inspekcije kanalizacijskih cijevi.

**Ključne riječi:** CCTV, cijevi, čišćenje, funkcionalnost, sustav javne odvodnje

### Abstract

The public drainage system encompasses a series of facilities and devices whose purpose is to collect, transport, purify, and ultimately discharge wastewater into a recipient, making it very important for preservation of public health. However, in order for each building to fulfil its purpose and meet user requirements, proper and timely maintenance is essential. The same applies to the public drainage system, whose maintenance is often not carried out to



the extent necessary. An important part of the public drainage system is the underground pipes, making their maintenance quite challenging. Some of the maintenance activities for sewer pipes include flushing (cleaning) and visual inspection using CCTV. By regular cleaning according to a defined schedule, sediments are removed from the pipes. Cleaning can be done using mechanical tools and high-pressure water flushing. The use of specially designed cameras for sewer pipes is known as CCTV inspection. Quality control, demonstrated through CCTV inspection, assesses structural stability and functionality according to the prescribed deadlines. The work will also outline specific legal regulations and norms necessary for maintaining the public drainage system. Additionally, it will briefly describe pipe cleaning methods, augers for sewer cleaning machines, conducting CCTV inspections, and various inspection methods for sewer pipes.

**Key words:** CCTV, pipes, cleaning, functionality, public drainage system

## 1. Uvod

Prema Zakonu o vodnim uslugama (NN 66/19) javna odvodnja je „djelatnost skupljanja komunalnih otpadnih voda, njihova pročišćavanja i ispuštanja u prirodni prijamnik putem građevina za javnu odvodnju te upravljanje tim građevinama; javna odvodnja je i djelatnost pražnjenja i odvoza komunalnih otpadnih voda iz individualnih sustava odvodnje, što uključuje i pražnjenje i odvoz mulja iz malih sanitarnih uređaja; javna odvodnja ne uključuje pročišćavanje komunalnih otpadnih voda ako uređaj za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda nije u funkcionalnoj uporabi, a uključuje pročišćavanje ako je kolektor sustava javne odvodnje priključen na uređaj za pročišćavanje industrijskih otpadnih voda“ [1].

Kod projektiranja i izgradnje građevina za odvodnju otpadnih voda, kao što su kanali (cjevovodi) za prikupljanje i odvodnju, ključno je osigurati njihovu vodonepropusnost. Dodatno, neke javne građevine za odvodnju otpadnih voda podliježu kontroli kako bi se provjerila strukturalna stabilnost i funkcionalnost. Ovo je propisano člankom 6. Pravilnika o tehničkim zahtjevima za građevine odvodnje otpadnih voda, kao i rokovima obvezne kontrole ispravnosti građevina odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda (NN 3/11) [2].

Tako se u prethodno navedenom pravilniku, članku 5. navodi da je „kao podloga za kontrolu i dokaz ispravnosti strukturalne stabilnosti i osiguranja funkcionalnosti potrebna baza podataka s preglednom situacijom“ [2].

Inženjeri širom svijeta prepoznaju da je proaktivno i preventivno održavanje sustava javne odvodnje često ekonomičnije od tradicionalnog pristupa – reaktivnog održavanja [3]. Već pri projektiranju sustava javne odvodnje važno je razmotriti mogućnosti održavanja, a održavanje direktno utječe na minimalne potrebne promjere cijevi (iako ne isključivo). Na primjer, na početku dionica otpadne vode često su vrlo malih količina, posebno kod odvodnje sanitarnih otpadnih voda u razdjelnom sustavu. Iako bi teoretski bilo moguće koristiti vrlo male profile cijevi na temelju početnih protoka i nagiba, iskustvo iz prakse pokazuje da je primjena takvih profila nepovoljna i često dovodi do začepljenja kanala. Korištenje manjih profila znatno povećava troškove održavanja gravitacijskog sustava javne odvodnje zbog čestog potrebnog čišćenja [4].





Održavanje se klasificira u tri tipa: korektivno održavanje, preventivno održavanje i predvidivo održavanje. Korektivno održavanje je reaktivni pristup koji se najčešće primjenjuje kada oprema ili sustav otkazu ili su već potrošeni. Često rezultira stanjem sustava izvan pogona, što može biti skupo. Sustavi koji se oslanjaju isključivo na ovaj tip održavanja često loše funkcioniraju, posebno u starijim fazama životnog ciklusa. Korektivno održavanje se također naziva „održavanje u nuždi“ i razlikuje se između redovnih nuždi i posebnih situacija. Redovne nužde su svakodnevni problemi poput začepljenih cijevi ili pukotina. Učinkovitim programom održavanja moguće je smanjiti učestalost ovih problema. Posebne situacije obično uključuju oluje, poplave, potrese ili druge nepredvidive događaje koji dovode do prekida rada dijela ili cijelog sustava. Potpuno oslanjanje na korektivno održavanje otežava planiranje i raspoređivanje radnih zadataka, dodjelu sredstava u proračunu i često rezultira kvarovima opreme i sustava. Preventivno održavanje je proaktivni pristup koji se temelji na programiranom i planiranom održavanju s ciljem sprječavanja smetnji i kvarova. Može se rasporediti prema povijesnim potrebama sustava ili razdobljima. Prednost preventivnog održavanja je što se može planirati i uključiti u raspored. To omogućava učinkovito upravljanje ljudskim i materijalnim resursima te lakše prepoznavanje potencijalnih problema u radu sustava [5].

Naglašena je važnost sustava javne odvodnje kao ključne infrastrukture, posebice kroz činjenicu da je ovaj sustav, kao dio komunalnih vodnih građevina unutar sektora vodnog gospodarstva, prepoznat kao kritična infrastruktura sukladno članku 4. Zakona o kritičnim infrastrukturama (NN 56/13, 114/22) [6,7].

Zakonska regulativa koja obuhvaća pojmove građevina za javnu odvodnju, daje osnovne podatke o kanalizacijskim sustavima u RH i definira određene uvjete za obavljanje djelatnosti javne odvodnje je sljedeća:

- Zakon o vodama (NN 66/19, 84/21, 47/23) [8–10]
- Zakon o vodnim uslugama (NN 66/19) [1]
- Plan upravljanja vodnim područjima do 2027. (NN 84/23) [11]
- Strategija upravljanja vodama (NN 91/08) [12]
- Pravilnik o posebnim uvjetima za obavljanje djelatnosti javne odvodnje (NN 28/11, 16/14) [13,14]
- Pravilnik o tehničkim zahtjevima za građevine odvodnje otpadnih voda, kao i rokovima obvezne kontrole ispravnosti građevina odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda (NN 3/11) [2]
- Pravilnik o posebnim uvjetima za obavljanje djelatnosti ispitivanja vodonepropusnosti građevina za odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda (NN 9/20) [15].

## 2. Čišćenje sustava javne odvodnje

Ispravno funkcioniranje kanalizacijskog sustava uvjetovano je redovnim održavanjem svih dijelova kanalizacijskog sustava [16].

Troškovi korektivnih akcija, tj. održavanja su dva do deset puta veći nego troškovi preventivnog održavanja [17], stoga se preventivnim akcijama treba dati prednost. Također,

neočekivani kvarovi, puknuća cijevi, zastoji u radu ili bilo što drugo kod sustava javne odvodnje mogu prouzročiti onečišćenje okoliša, poplavu ili neki drugi problem [18].

Kao dio preventivnog održavanja, čišćenje cijevi je ključna mjera. Cilj je osigurati da sustav javne odvodnje funkcionira prema projektiranoj svrsi, a održavanje treba smanjiti broj začepjenja i širenje neugodnih mirisa. Sustav javne odvodnje se redovito čisti prema utvrđenom rasporedu kako bi se uklonili nakupljeni ostaci u cijevima. Ti ostaci smanjuju kapacitet cijevi i mogu dovesti do začepjenja, što rezultira izlivanjem otpadnih voda na površinu. Također, korijenje i korozija mogu uzrokovati ozbiljnu štetu na cjevovodnom sustavu [5].

Čišćenje sustava javne odvodnje zahtijeva uobičajene alate, poput pijuka, tronožaca, zastavica upozorenja, baterija, lampi, užadi, kuka, itd., te specijalnu opremu i uređaje (četke, lance za razbijanje taloga, noževe za sječenje i čupanje korijenja, kuke, posude za izvlačenje mulja, itd.).

Čišćenje može biti:

- 1) mehaničkim sredstvima
- 2) ispiranjem.

Tablica 1. definira uvjete pod kojima su određene metode čišćenja najučinkovitije.

**Tablica 1.** Učinkovitost promatranih tehnika čišćenja [19]

Tehnika čišćenja	Začepjenja	Masti	Korijenje	Pijesak, šljunak, krhotine	Mirisi
Kugla		●		●	●
Pod pritiskom	·	●		●	●
Ispiranje					·
Čistači		●		●	
Strugači				·	
Sajle/svrdla na motorni pogon	●	·	●		
Ručne sajle/svrdla	●	·	·		
Kemikalije		·	●		●

Legenda:  
 ● = najučinkovitije rješenje za promatrani problem  
 · = najmanje učinkovito rješenje za promatrani problem

Čišćenje mehaničkim sredstvima se radi specijalnim uređajima kao što su četke, lanci za razbijanje taloga, noževi za sječenje i čupanje korijenja, kuke, posude za izvlačenje mulja. Ovi alati se vuku kroz kanal ručno ili mehanički [20].

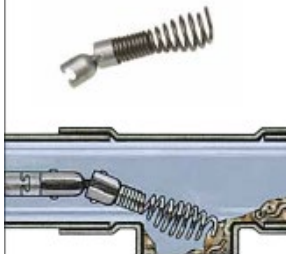
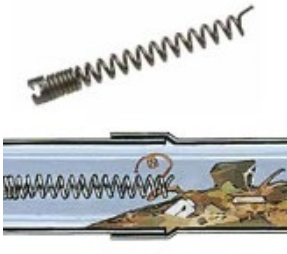
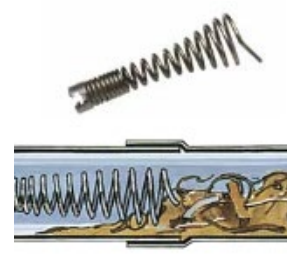
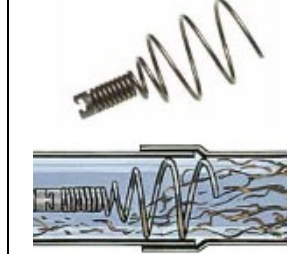



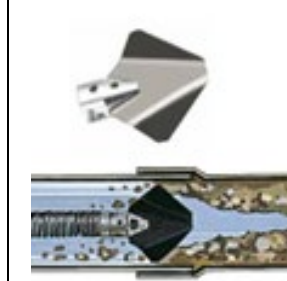
Za navedene poslove postoje različiti modeli strojeva (Slika 1.) za čišćenje na koje je moguće montirati različite nastavke za čišćenje (Tablica 2.), ovisno o tome namjerava li se čistiti korijenje, talog, probiti začepljenje, izvaditi krpe, naći izgubljenu sajlu, itd. [21].



**Slika 1.** Stroj za čišćenje sustava javne odvodnje – kućnih priključaka [22]

Kako bi se moglo očistiti – odčepiti različite zastoje u cijevima – potrebno je koristiti različite vrste svrdala. Različite vrste svrdala, odnosno nastavaka koje može koristiti stroj za čišćenje kanalizacijskih cijevi prikazane su u tablici 2. Navedeni stroj koristi se za čišćenje kanalizacijskih cijevi kod kućnih priključaka.

**Tablica 2.** Primjeri različitih modela svrdala za stroj za čišćenje sustava javne odvodnje (izrada autora prema: [21,23])

<p>Svrdlo s padajućom glavom</p> 	<p>Ravno svrdlo</p> 	<p>Ljvkasto svrdlo</p> 	<p>Kukasto svrdlo</p> 
<p>Povratno svrdlo</p> 	<p>Lopatasto svrdlo</p> 	<p>Četverolisni pilasti sječač</p> 	<p>Rezač maziva</p> 

Nadalje, čišćenje pod visokim tlakom postalo je najčešća metoda održavanja protočnosti kanalizacijskih cijevi manjeg i srednjeg promjera [24]. Ova metoda uključuje ispiranje sustava javne odvodnje pod visokim tlakom pomoću specijalnih visokotlačnih cijevi i mlaznica (Slika 2.) kako bi se cijevi očistile od nakupljenih nečistoća. Mlaznice dolaze u različitim varijantama, obično s jednim otvorom prema naprijed i više manjih otvora usmjerenih unatrag, čime se učinkovito čiste stijenke cijevi. Sva potrebna oprema (visokotlačne cijevi, spremnik za vodu, spremnik za otpadnu vodu, mlaznice, visokotlačna pumpa itd.) smještena je na specijalno opremljenim kamionima namijenjenim za čišćenje kanalizacijskog sustava (Slika 3.). Ovi kamioni često imaju i spremnik za prikupljanje otpadnih voda, omogućujući usisavanje nakupljenih nečistoća ili taloga putem crpke i njihovo odgovarajuće zbrinjavanje [21].



**Slika 2.** Mlaznice za čišćenje sustava javne odvodnje [25]



**Slika 3.** Kamion za čišćenje sustava javne odvodnje [26]

### 3. Metode pregleda i inspekcije sustava javne odvodnje

Postoje različite metode inspekcije i pregleda kanalizacijskih cijevi, a one su pregledno prikazane u tablici 3. Najčešće se upotrebljava vizualna inspekcija pomoću CCTV (engl. *closed-circuit television* – snimanje kamerama, televizijska inspekcija) opreme ili ulaženjem radnika u kanalizaciju gdje je to moguće [21,27]. Navedena inspekcija pomoću CCTV opreme je desetljećima bila korištena za pregled stanja kanalizacijskog sustava i unutarnjih površina cijevi [28].

**Tablica 3. Metode pregleda i inspekcije kanalizacijskog sustava [21,29]**

Tehnologija		Vrsta kanalizacije			Vrsta materijala	Promjer cijevi (mm)	Detektirani problem			
		Gravitacijska	Tlačna	Prikjučci			Stanje unutar cijevi	Stijenka cijevi	Curenje	Oslonac cijevi
Kamere	Digitalne kamere	•			A	150-1500	•	•	•	
	Zoom kamere	•			A	>150	•	•	•	
	Endoskop kamera			•	A	25-300	•	•	•	
Akustična	Detektori curenja	•	•		A	≥100			•	
	Sustav za monitoring		•		PCCP	≥450		•		
	Sonar/ultrazvuk	•	•		A	≥50	•	•		
Elektro/ Elektromag netski	Elektronska detekcija curenja	•	•	•	NM	≥75			•	
	Polje elektromagnetskog strujanja (RFEC)	•	•	•	metal, PCCP	≥50		•	•	
	Magnetski tok	•	•	•	metal	50-1400		•		
Laser	Lasersko profiliranje	•	•		A	100-4000	•	•		
Inovativne tehnologije	Gama zračenje	•	•	•	beton	N.D.				•
	Georadar	•	•	•	A	N.D.			•	•
	Infracrvena termografija	•	•	•	A	N.D.			•	•
	Mikro defleksija	•			opeka	N.D.		•		•
	<i>Impact echo</i> / SASW	•			opeka/ beton	>1800		•		

Skraćenice u tablici:

A – bilo koja vrsta materijala

*Impact echo* – impact echo metoda

N.D. – nije definirano

NM – nemetalno

PCCP – prenapregnuta betonska okrugla cijev (od engl. *Pre-stressed cylindrical concrete pipe*)

RFEC – polje elektromagnetskog strujanja (od engl. *Remote Field Eddy Current*)

SASW – spektralna analiza površinskih valova (od engl. *Spectral analysis of surface waves*)

#### 4. CCTV inspekcija

Prema Pravilniku o tehničkim zahtjevima za građevine odvodnje otpadnih voda, kao i rokovima obvezne kontrole ispravnosti građevina odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda (NN 3/11), članku 2. CCTV je „televizijska inspekcija (optički pregled) građevina za odvodnju otpadnih voda opremom zatvorenog kruga kojom se evidentiraju i zapisuju sva stanja unutar tih građevina“ [2].

Najčešće korištena tehnika pregleda kanalizacijskih cijevi je CCTV inspekcija. Ova je tehnologija prvi put uvedena kasnih 1960-ih i dominirala je pregledom kanalizacijskih cijevi na tržištu od tada. CCTV tehnologija, kojom se upravlja daljinski, koristi ručno gurana ili motorizirana kolica s kamerom (Slika 4.) za snimanje niza slika.



**Slika 4.** Motorizirana kolica s CCTV kamerom [30]

Te slike zatim vizualno procjenjuje operater za CCTV inspekciju (Slika 5.) koji identificira pojedinačne nedostatke i radi procjenu stanja unutar cijevi koristeći standardne metode klasifikacije. Prednosti metode su u tome što pruža niz slika stijenki cijevi koje se mogu pohraniti na licu mjesta i zatim ispitati kasnije. Prilikom naknadnog pregleda sakupljenih slika, svaki nedostatak se može uočiti, zabilježiti njegov položaj i vrsta kvara klasificirani na temelju standardne metode klasifikacije [31].



**Slika 5.** Operater za CCTV inspekciju te oprema [30]

Određene norme koje je potrebno poznavati kod provedbe inspekcije su:

- Investigation and assessment of drain and sewer systems outside building - Part 2: Visual Inspection coding system (EN 13508-2:2003+A1:2011) [32]

- Ispitivanje i ocjena sustava odvodnje i kanalizacije izvan zgrada - 1. dio: Opći zahtjevi (EN 13508-1:2012) [33]
- Polaganje i ispitivanje odvoda i kanalizacijskih cijevi (EN 1610:2015) [34].

Prije same CCTV inspekcije potrebno je odrediti koja sekcija se pregledava, pripremiti revizijska okna, kao i napraviti čišćenje i ispiranje revizijskih okana te dijela cjevovoda koji se pregledava. Nakon toga se priprema traktor za snimanje i CCTV kamera. Zatim je potrebno provjeriti je li sve ispravno priključeno i radi li kako treba. Nakon toga se motorizirana kamera spušta u revizijsko okno, provjerava je li sve ispravno priključeno te započinje sa samim snimanjem cijevi. Prilikom snimanja cjevovoda obavlja se vizualno kodiranje te obrađuju izlazni podatci, odnosno rezultati.

Sustav kodiranja koji se koristi prilikom CCTV-a propisan je normom EN 13508-2:2003+A1:2011 [32], a kodovi su grupirani u 4 dijela, i to:

- kodovi glede materijala cjevovoda (BA...)
- kodovi glede rada cjevovoda (BB...)
- kodovi za utvrđivanje stanja (BC...)
- ostali kodovi (BD...) [32].

Tako naprimjer, ako je došlo do prianjanja tvari za stijenk cijevi glavni kod će biti BBB, a onda se obavlja karakterizacija prema vrsti tvari koje prianjaju te slovne oznake nakon glavnog koda (nakon BBB.) mogu biti: A ako je to stvrdnuto taloženje, B ako je masnoća, C ako je obraštaj ili Z ako su druge tvari [32]. Pa ako je slučaj da su tvari koje prianjaju uz stijenk cijevi stvrdnute, onda će kod biti BBB.A.





Osim uporabe kodova važno je odrediti i položaj na obodu cijevi koji se određuje prema položaju kazaljki na satu [32]. Tako, utvrđeno stanje koje se nalazi npr. u središtu vrha cjevovoda bi se opisalo kao 12 sati.

Također se mjeri i udaljenost od početne točke (npr. revizijskog okna) i to u metrima.


Primjeri utvrđenih stanja unutar cijevi CCTV inspekcijom dani su u tablici 4.

**Tablica 4.** Primjeri utvrđenih stanja CCTV inspekcijom (izrada autorice Mesaroš)

Fotografija – primjer stanja	Kratki opis stanja	Kod
	<p>Korijenje, glavni korijen, smanjenje presjeka cijevi = 10 %</p>	<p>BBA.A</p>

<p>14 RO43 RO36</p> <p>Psn: 2 - 11; Tvari koje prijanjaju, Zakorene tvari, Smanjenje presjeka cijevi = 80%</p>  <p>12.12.23 12:43 LC1: 10,9m v: 0cm/s N: -4,3% PC: 101 0:02:28</p>	<p>Tvari koje prijanjaju, zakorene tvari, smanjenje presjeka cijevi = 80 %</p>	<p>BBB.A</p>
<p>11 RO12 RO11</p>  <p>10.10.23 13:17 LC1: 14,8m v: 0cm/s N: -6,1% PC: 120 0:03:18</p>	<p>Deformacija, vertikalno, smanjenje presjeka cijevi = 90 %</p>	<p>BAA.A</p>
<p>24 RO25 RO24</p>  <p>24.11.23 13:09 LC1: 7,6m v: 19cm/s N: -4,1% PC: 356 0:01:36</p>	<p>Stršeci priključak, duljina zadiranja = 99 %</p>	<p>BAG</p>
<p>13 RO14 RO13</p> <p>Razina vode, bista otpadna voda (vidljiva kineta), Visina = 2%</p>  <p>08.04.24 15:52 LC1: 1,9m v: 0cm/s N: -2,0% PC: 39 0:00:39</p>	<p>Razina vode, bistra otpadna voda (vidljiva kineta), visina = 2 %</p>	<p>BDD.A</p>



<p>01 RO103 RO155</p> <p>Psn: 5 - 7; Druge prepreke, Drugi predmeti nalaze se u dnu cijevi, Smanjenje presjeka cijevi = 50%</p> 	<p>Druge prepreke, drugi predmeti nalaze se u dnu cijevi, smanjenje presjeka cijevi = 50 %</p>	<p>BBE.C</p>
---	--	--------------

## 5. Zaključak

Održavanje sustava javne odvodnje je vrlo složen zadatak. Svaki dan u godini sustav javne odvodnje je u uporabi te je vrlo nezgodno za korisnike istog, ako on nije u funkciji. Nadalje, njegovo ispravno funkcioniranje je preduvjet za očuvanje javnog zdravlja ljudi. Također, o važnosti sustava javne odvodnje govori podatak da je prepoznat kao kritična infrastruktura. Sustav javne odvodnje potrebno je pravovremeno i ispravno održavati. Najčešće aktivnosti održavanja su čišćenje i ispiranje te kontrola ispravnosti. Čišćenje se može provoditi mehaničkim sredstvima i strojevima za čišćenje te ispiranjem vodom pod velikim pritiskom. Iako postoji različite metode inspekcije i pregleda kanalizacijskih cijevi, najčešće se koristi CCTV inspekcija. Kontrola ispravnosti, koja se dokazuje CCTV inspekcijom, provodi se na svojstvo strukturalne stabilnosti i funkcionalnosti prema rokovima koji su propisani. Kako bi se CCTV inspekcija provodila potrebna je skupa oprema, stručni i osposobljeni zaposlenici. Isto tako potrebno je poznavati norme koje se koriste kod provođenja inspekcije te sustav kodiranja stanja cjevovoda.

## 6. Literatura

- [1] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o vodnim uslugama. Republika Hrvatska, 2019.
- [2] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Pravilnik o tehničkim zahtjevima za građevine odvodnje otpadnih voda, kao i rokovima obvezne kontrole ispravnosti građevina odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda. Republika Hrvatska, 2011.
- [3] Fenner, R. A. Approaches to sewer maintenance: a review // *Urban Water*, 2 (2000), 4; 343–356. (ISSN 1462-0758)
- [4] Hrskanović, Ivan. Održavanje sustava odvodnje naselja. diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2016.
- [5] Šperac, Marija; Hrskanović, Ivan; Šreng, Željko. Održavanje gravitacijskih kanalizacijskih sustava // 26. Međunarodni znanstveno-stručni skup „Organizacija i tehnologija održavanja“ - OTO 2017. - Zbornik radova I. Glavaš, Hrvoje; Barić, Tomislav; Nyarko, Karlo Emmanuel; Barukčić, Marinko; Keser, Tomislav; Karakašić, Mirko (ur.). (ISBN 978-953-6032-92-1). Osijek: Fakultet elektrotehnike, računarstva i

- informacijskih tehnologija Osijek (FERIT); 26.05.2017, str. 125–131.
- [6] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o kritičnim infrastrukturama. Republika Hrvatska, 2022.
- [7] Obradović, Dino; Šperac, Marija. Procjena troškova održavanja sustava javne odvodnje u Republici Hrvatskoj. // *Zbornik radova, 9. Sabor hrvatskih graditelja / Lakušić, Stjepan (ur.). (ISBN 978-953-6686-22-3), Cavtat: Hrvatski savez građevinskih inženjera, 21.04.-24.04.2024., str. 399–411.*
- [8] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o vodama. Republika Hrvatska, 2019.
- [9] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o izmjenama zakona o vodama. Republika Hrvatska, 2021.
- [10] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o vodama. Republika Hrvatska, 2023.
- [11] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Plan upravljanja vodnim područjima do 2027. Republika Hrvatska, 2023.
- [12] Hrvatske vode. Strategija upravljanja vodama. Zagreb: Hrvatske vode, 2009.
- [13] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Pravilnik o posebnim uvjetima za obavljanje djelatnosti javne odvodnje. Republika Hrvatska, 2011.
- [14] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o posebnim uvjetima za obavljanje djelatnosti javne odvodnje. Republika Hrvatska, 2014.
- [15] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Pravilnik o posebnim uvjetima za obavljanje djelatnosti ispitivanja vodonepropusnosti građevina za odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda. Republika Hrvatska, 2020.
- [16] Kujundžić, B (ur.). Kanalizacija Beograda 1905 -1975. Beograd: NIP "Export-press"; 1975.
- [17] Anbari, Mohammad Javad; Tabesh, Massoud; Roozbahani, Abbas. Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks // *Journal of Environmental Management*, 190 (2017); 91–101. (ISSN 1095-8630)
- [18] Robles-Velasco, Alicia; Cortés, Pablo; Muñuzuri, Jesús; Onieva, Luis. Estimation of a logistic regression model by a genetic algorithm to predict pipe failures in sewer networks // *OR Spectrum*, 43 (2021); 759–776. (ISSN 1436-6304)
- [19] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Collection Systems O&M Fact Sheet: Sewer Cleaning and Inspection. Washington, D.C., 1999.
- [20] Margeta, Jure. Kanalizacija naselja. Split, Osijek, Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Institut građevinarstva Hrvatske, 1998.
- [21] Obradović, Dino. Doprinos povećanju učinkovitosti održavanja kanalizacijskih sustava primjenom modela procjene troškova održavanja, doktorska disertacija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2022.
- [22] Emerson Electric Co. Ridgid 2021. [Online]. Dostupno na: <https://www.ridgid.com/us/en/k1000-rodder-machine>. (Pristupljeno 10.07.2024.)
- [23] Emerson Electric Co, Ridgid. Cable Tools 2021:20–21. [Online]. Dostupno na: <https://cdn2.ridgid.com/resources/media?key=d3f41178-3340-4bf6-8e05-ba967a79d31c&languageCode=en&type=document> (Pristupljeno 09.07.2024.)
- [24] Hoffman, E. Daniel; Buchberger, G. Steven; Flanders, U. Michael. Preventing Sewer Blowouts during High-Velocity Jet Cleaning Operations // *Journal of Infrastructure Systems*, 16 (2010), 4, 273–281. (ISSN 1943-555X)
- [25] HENNLICH d.o.o. Oprema za čišćenje odvodnih cijevi i kanalizacije, [Online].



Dostupno na: <https://www.hennlich.hr/proizvodi/oprema-za-ciscenje-odvodnih-cijevi-i-kanalizacije-oprema-za-visokotlacne-strojeve-za-ciscenje-odvodnih-cijevi-i-kanalizacije-12745.html> (Pristupljeno 27.12.2022.)

- [26] Obradović, Dino; Šperac, Marija; Marenjak, Saša. Challenges in Sewer System Maintenance // *Encyclopedia*, 3 (2023), 1; 122–142. (ISSN 2673-8392)
- [27] Makar, J. M. Diagnostic Techniques for Sewer Systems // *Journal of Infrastructure Systems*, 5 (1999), 2; 69–78. (ISSN 1943-555X)
- [28] Halfawy, R. Mahmoud; Hengmeechai, Jantira. Efficient Algorithm for Crack Detection in Sewer Images from Closed-Circuit Television Inspections // *Journal of Infrastructure Systems*, 20 (2014), 2 (ISSN 1943-555X)
- [29] Feeney, S. Christopher; Thayer, Scott; Bonomo, Michael; Martel, Kathy. United States Environmental Protection Agency. White Paper on Condition Assessment of Wastewater Collection Systems. Cincinnati, Ohio, 2009.
- [30] Hoerr Construction, Inc. CCTV Inspection 2023. [Online]. Dostupno na: <https://hoerr.com/trenchless-rehabilitation/cctv-inspection/> (Pristupljeno 08.07.2024.)
- [31] Romanova, Anna; Horoshenkov, V. Kiril; Tait, J. Simon; Ertl, Thomas. Sewer inspection and comparison of acoustic and CCTV methods // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 166 (2013), 2; 70-80. (ISSN 1751-7729)
- [32] Hrvatski zavod za norme. Investigation and assesment of drain and sewer systems outside building - Part 2: Visual Inspection coding system (EN 13508-2:2003+A1:2011). Zagreb, 2011.
- [33] Hrvatski zavod za norme. Ispitivanje i ocjena sustava odvodnje i kanalizacije izvan zgrada - 1. dio: Opći zahtjevi (EN 13508-1:2012). Zagreb, 2013.
- [34] Hrvatski zavod za norme. Polaganje i ispitivanje odvoda i kanalizacijskih cijevi (EN 1610:2015). Zagreb, 2015.



# Opasnosti i potrebne mjere za sigurnost pri radu s građevinskim skelama

## *Dangers and necessary measures for safety when working with construction scaffolding*

D. Vidaković<sup>1,\*</sup>, A. Jurić<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [dvidak@qfos.hr](mailto:dvidak@qfos.hr)

### Sažetak

Zbog visine skela kod radova na građevinama veliki je rizik od nezgoda kao što su rušenje skele, pad radnika i pad predmeta s visine. U članku su opisane karakteristike pojedinih vrsta skela i naglašene opasnosti kod rada s njima. Članak daje pregled zakonskih propisa i normi koji definiraju pravila za siguran rad sa skelama. Na temelju iskustva u praksi upozoreno je na probleme koji se događaju na gradilištima i dani su naputci za postupanja u cilju smanjivanja rizika od neželjenih događaja.

**Ključne riječi:** skele, opasnosti, propisi, norme, mjere zaštite na radu

### Abstract

Due to the height of the scaffolding during construction work, there is a great risk of accidents such as the collapse of the scaffolding, workers falling and objects falling from a height. The article describes the characteristics of certain types of scaffolding and emphasizes the dangers of working with them. The article provides an overview of legal regulations and norms that define the rules for safe work with scaffolding. On the basis of practical experience, a warning was given about problems that occur on construction sites, and instructions were given for action in order to reduce the risk of unwanted events.

**Key words:** scaffolding, dangers, regulations, norms, safety measures at work.

### 1. Uvod

Općenito, skele se ubrajaju u radnu opremu, a radna oprema je jedna od vrsta sredstava rada. U građevinarstvu se skele često koriste kao pomoćne, privremene konstrukcije u visokogradnji, ali i kod izgradnje, održavanja i rušenja drugih vrsta građevina (za radove na visini iznad 150 cm). Osim za izvođenje radova, mogu služiti i kao prihvatne skele, za pridržavanje konstrukcija i oplata s materijalom u njima te za zaštitu od padova. Primjerice, „Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu u Knjizi 1. Gradnja i održavanje regulacijskih i zaštitnih vodnih građevina i vodnih građevina za melioracije“ imaju posebno



poglavlje o tesarskim radovima i skelama, a skele i oplate su i jedno od potpotpoglavlja u „Betonskim radovima“, kao i čelične cijevne skele u poglavlju „Bravarski radovi“ [1]. Postavljanje i rastavljanje skela jedan je od najopasnijih radova u građevinarstvu [2]. Glavna opasnost za radnike na skeli je rad na visini, a rizik povećava odvijanje radova na otvorenom, u lošim klimatskim uvjetima. Upravo padovi radnika najčešći su način nastanka teških ozljeda na gradilištima (oko trećine) i u Hrvatskoj i u svijetu [3] [4] [5]. Prema nacionalnoj klasifikaciji sredstva poremećaja, u Hrvatskoj je 2022. godine 117 radnika u građevinarstvu ozlijeđeno pri kretanju na zgradama, građevinama i površinama iznad razine zemlje, u koje su uključene različite skele, ljestve, podizajuće platforme i sl. [6]. Poslije padova radnika, najčešće su ozljede od padova predmeta na radnika, a i to također može biti kod skela.

Propisi za siguran rad definiraju kako skele moraju biti izvedene da je odlaganje materijala i opreme sigurno i da su radnici zadovoljavajuće zaštićeni od pada i od predmeta koji mogu pasti s visine. Ipak, i pored postojeće zakonske regulative događaju se nezgode i nesreće sa skelama. One su vrlo rijetko uzrokovane nekom višom silom, već se najčešće utvrdi kako su posljedica nepridržavanja pravila za rad na siguran način [3] [7].

## 2. Vrste skela i njihovi dijelovi

Osim za sigurnost, odabir odgovarajuće skele važan je za trošak i rok izvođenja radova. Zato pri tome treba uzeti u obzir planirane aktivnosti (vrstu i količinu rada) i predviđena opterećenja, karakteristike projekta (visinu, pristup, prostor, svojstva postojeće građevine i sl.), lokaciju i uvjete okoline (klimatske), raspoloživu radnu snagu i opremu, dinamiku radova i isplativost, odnosno troškove.

Postoje različite vrste skela koje se koriste u građevinarstvu, a njihove podjele mogu biti po različitim karakteristikama. U tablici 1. su pokazane skele prema konstrukciji i namjeni.

**Tablica 1.** Vrste skele i njihova najčešća primjena [8] [9] [10]

Prema konstrukciji	Primjena
Na nogarima Na ljestvama	- za male visine i uglavnom za zidarske radove - za manji opseg i lakše radove (održavanje, odnosno popravci) do visine ljestava
Pokretne (u obliku tornja s pravokutnom osnovicom, na točkovima s kočnicama) Viseće (ovješene s ravnog krova)	- za manje radove u unutarnjim i vanjskim prostorima do 12 m visine - za manji opseg i lakše radove na fasadi (najčešće održavanje) ako se mogu montirati
Konzolne (izbočene - na rubu objekta)	- za manji opseg i lakše radove na fasadi (za kretanje radnika) i za zaštitu od padova
Na stupovima - različitih dimenzija i nosivosti (drvene ili češće metalne, tj. cijevne) Toranjske (od tipskih elemenata)	- za radove na fasadi, za pridržavanje i za zaštitu od padova predmeta s visine - za podupiranje velikih i visokih konstrukcija (uglavnom oplate s armiranim betonom)

Osim u tablici navednoga, skele se razlikuju prema:

- materijalima (metalne, odnosno čelične i aluminijske, drvene, najčešće od četinara, a u nekim dijelovima svijeta često od bambusa),



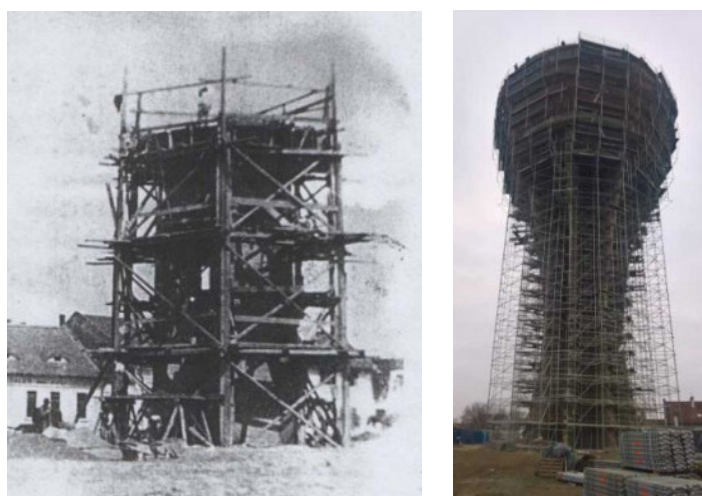
- nosivosti (lake – za fasaderske radove, zaštitu, komunikacije i sl. i teške – za pridržavanje horizontalnih, kosih i lučnih elemenata građevina, odnosno ispod ploča, greda i dr.) i
- statičkom sustavu konstrukcije (štapovi s djelomično uklještenim vezama i okviri s djelomično uklještenim i zglobnim vezama).

Iz prethodno napisanog vidi se da skele prema namjeni mogu biti:

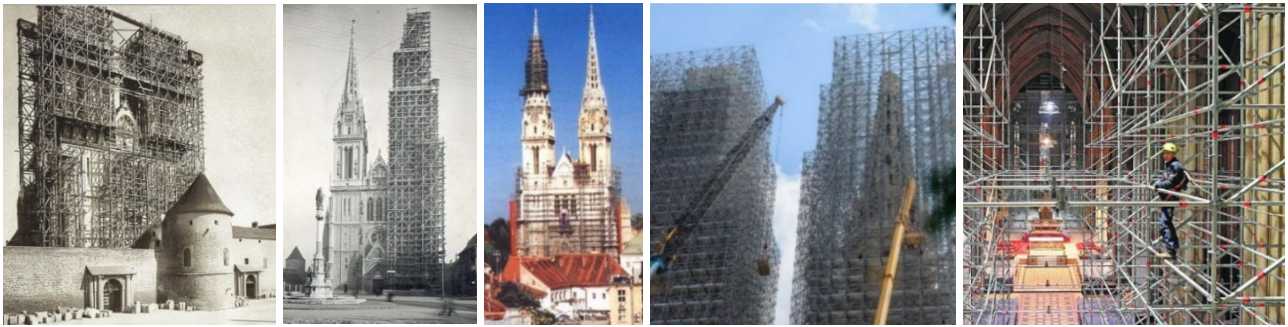
- radne ili pomoćne (za kretanje radnika i prijenos materijala, alata i dr. opreme i radnika te obavljanje radova kao što su fasaderski, žbukanje, zidanje, monataža i popravci, ličenja i razna druga održavanja i sl.),
- nosive ili potporne (primaju opterećenje od cijele građevine ili njenog dijela u izgradnji i prenose ga na čvrstu, nosivu podlogu sve dok sama ne postane sposobna da preuzme to opterećenje, a posebna vrsta nosivih skela su one za pridržavanja dijelova nosive konstrukcije u fazi montaže),
- zaštitne (štite ljude ili neko materijalno dobro od oštećenja, kao npr. prihvatne skele koje štite od padova predmeta s visine veće od 5 m),
- privremene konstrukcije od skela (npr. nadstrešnice, tribine, stubišta i panoi) i dr.

Najčešće se koriste nosive skele od čeličnih bešavnih cijevi (uobičajene dužine od 1,5 m do 5,0 m i vanjskog promjera 48,3 mm za lake skele, a većeg za teške) i fasadne, koje mogu biti brzomontažne, od modularnih H okvira (napravljenih od pocinčanih čeličnih cijevi) [10]. Glavni dijelovi takvih skela su vertikalni stupovi (na razmaku 180 - 250 cm, ovisno od opterećenja i od vrste cijevi i čelika), horizontalni štapovi koji nose radnu stazu (širine min. 80 cm) i zaštitne ograde te kosi (dijagonalni) štapovi koji ukrućuju skelu u horizontalnom smjeru. Uz čelične cijevi, elementi tipskih skela su još spojnice (križne i okretne), vijci za povezivanje, sidra za povezivanje skele s građevinom, papučice i podlošci, podnice (za radnu stazu ili platformu), poklopci i ljestve (širine najmanje 45 cm i s razmakom između prečki do 32 cm [8]) ili stepenice. Kod teških skela nosači mogu biti I-profil i rešetke. Toranjske skele slažu se od trapeznih okvira, ali one nemaju podnice i ljestve.

Na slikama 1. i 2. pokazane su tradicijske skele prije više od 100 godina i složeni sustavi suvremenih skela. Radovi na takvim građevinama teško su zamislivi bez skela.



**Slika 1.** Skela kod gradnje starog vodotornja u Vukovaru prije Prvog svjetskog rata [11] i nakon Domovinskog rata skela na obnovi vukovarskog Vodotornja izgrađenog 1968. [12]



**Slika 2.** Skele na izgradnji, održavanju i obnovi zagrebačke katedrale (s lijeva na desno: gradnja tornjeva početkom 20. st., obnova 1939., održavanje početkom 21. st. i obnova nakon potresa 2020. – skela na tornjevima i iznutra) [13] [14]

### 3. Propisana pravila za siguran rad sa skelama

#### 3.1 Tehnička regulativa

Direktive EU određuju minimalne norme za osiguravanje sigurnosti i zdravlja radnika na radnom mjestu, a sve države članice moraju usklađivati svoja nacionalna zakonodavstva s pravnom stečevinom EU. Pod tim se smatra preuzimanje odredbi direktiva i odluka EU u nacionalno zakonodavstvo i osiguravanje pretpostavki za njihovu provedbu [15]. No, pojedine države i poslodavci mogu usvojiti i stroža pravila sigurnosti.

Pravila za siguran rad sa skelama u Hrvatskoj propisuju:

- Zakon o zaštiti na radu (2014) i njegove kasnije dopune,
- Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada (1984),
- Pravilnik o pregledu i ispitivanju radne opreme (2016),
- Pravilnik o zaštiti na radu pri uporabi radne opreme (2017) i
- Pravilnik o zaštiti na radu na privremenim gradilištima (2018).

Zaštita na radu (ZNR) kao organizirano djelovanje obuhvaća sustav pravila, poglavito pravila pri projektiranju, izradi, uporabi, održavanju, pregledu i ispitivanju sredstava rada, pravila koja se odnose na radnike i prilagodbu procesa rada njihovim osobinama i sposobnostima te načine i postupke osposobljavanja i obavješćivanja radnika i poslodavaca. Zakonom o ZNR propisane su obveze za poslodavce i za radnike. Poslodavci po načelu objektivne odgovornosti odgovaraju za ozljede na radu i profesionalne bolesti koje radnici pretrpe obavljajući poslove za njih. Poslodavci su obvezni imati procjenu rizika za život i zdravlje radnika u odnosu na sredstva rada, radni okoliš, tehnologiju, fizikalne štetnosti, uređenje mjesta rada, organizaciju procesa rada i druge rizike koji su prisutni, te u skladu s tom procjenom osigurati primjenu osnovnih i prema potrebi posebnih pravila zaštite na radu radi sprječavanja ili smanjenja razine rizika. Osnovna pravila sadrže zahtjeve za sredstva rada koja se koriste, a posebna pravila se odnose na radnike, način obavljanja poslova i radne postupke. Radnici poslove moraju obavljati u skladu sa znanjima i vještinama koje su stekli tijekom osposobljavanja za rad na siguran način i s dužnom pažnjom te pri tome voditi računa o svojoj sigurnosti i zaštiti zdravlja, kao i sigurnosti i zaštiti zdravlja ostalih radnika koje mogu ugroziti njihovi postupci ili propusti na radu [16]. Ovaj zakon obvezuje investitore da imenuju koordinate zaštite na radu. Koordinator u fazi projektiranja zadužen je za izradu plana izvođenja radova, koji između ostalog definira siguran rad sa skelom, a

koordinator u fazi izvođenja ima zadatak da na gradilištu koordinira primjenu načela ZNR, organizira suradnju i izvješćivanje s ciljem spječavanja ozljeda i nadgleda provode li se radovi prema planu te ukoliko je potrebno da ga ažurira [16].

*International Building Code* (IBC) sveobuhvatna je kompilacija temeljnih načela i kriterija za usmjeravanje projektiranja i izgradnje građevina koja uspostavlja obvezne minimalne standarde koje treba ispuniti, a sadrži i posebne odredbe za skele, gdje su određeni zahtjevi za njihove materijale, projektiranje, nosivost, pristup i sigurnost. U SAD-u standardi *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) daju smjernice za projektiranje, montažu, upotrebu i demontažu skele, pokrivajući različite aspekte, kao što su nosivost, zaštita od pada, pristup i zahtjevi za obuku radnika. U UK-u industriju skela predstavlja *National Access and Scaffolding Confederation* (NASC), koja također daje tehničke informacije i kodekse za promicanje sigurne prakse sa skelama [17].

Sustavno upravljanje uvjetima i čimbenicima na radnom mjestu koji negativno utječu na zdravlje i sigurnost radnika, posjetitelja ili trećih osoba uz stalna poboljšanja svrha je međunarodne norme ISO 45001:2018.

### 3.2. Projektiranje skela

Skele moraju biti konstruirane (dimenzionirane) i izvedene tako da odgovaraju predviđenim radovima, odnosno da s dovoljnom sigurnošću mogu preuzeti sva opterećenja (utjecaje) koji nastaju pri njihovom izvođenju i pri nošenju tereta te da osiguravaju siguran rad i prolaženje. Zato se moraju izvoditi prema projektu (planu) koji sadrži dimenzije skele, statički proračun nosivih elemenata, specifikaciju sastavnih dijelova s vrstom i kvalitetom materijala te definirana sredstva za spajanje sastavnih dijelova, način oslanjanja skele na tlo ili objekt i pričvršćivanja za građevinu, najveće dopušteno opterećenje i upute za montažu i demontažu s prikazom osnovnih mjera zaštite koje se primjenjuju pri tome i pri uporabi skele [9]. Također, u okviru toga definirano je osiguranje skele od vjetra, a treba biti i izjava o ograničenju upotrebe s obzirom na vjetar, snijeg i led.

Za tipske skele s atestom o sigurnosti i upotrebljivosti plan skele daje se u opsegu koji osigurava potpunu sigurnost radnika na radu i potrebno je samo pridržavati se uputstava proizvođača, odnosno ispuniti sve uvjete koje oni zahtevaju. Ako ne postoji ili nije dostupan statički proračun radne skele ili ako proračunom nisu obuhvaćena predviđena konstrukcijska rješenja Pravilnik o ZNR pri uporabi zaštitne opreme zahtjeva proračun nosivost i stabilnost, osim kada je radna skela sastavljena u skladu s opće priznatim normama [18]. Poseban proračun potreban je i za tipske skele kada se rade veće visine od predviđene. Najveća uobičajena visina skela od čeličnih cijevi je 25 m, ali od njih se mogu napraviti i skele većih visina, samo je onda neophodan statički proračun za dokaz njihove stabilnosti i nosivosti.

Pri projektiranju skela potrebno je pridržavati se sljedećih normi:

- HRN EN 1991-1-4:2012 i HRN EN 1991-1-4:2012/NA:2012 – Djelovanja na konstrukcije (Dio 1.4: Opća djelovanja – djelovanja vjetra) s dodatkom eurokodu HRN EN 1993 koji određuje vrijednosti nacionalnih parametara,
- HRN EN 12810-1:2004 – Fasadne skele od predgotovljenih elemenata (1. i 2. dio: Specifikacije za proizvode i Posebne metode proračuna),





- HRN EN 12811-1:2004 Privremena radna oprema – 1. dio: Skele - izvedbeni zahtjevi i projektiranje,
- HRN EN 12811-2:2008 Privremena radna oprema – 2. dio: Informacije o materijalima,
- HRN EN 12811-3:2004 Privremena radna oprema – 3. dio: Ispitivanje opterećenjem,
- HRN EN 12811-4:2013 Privremena radna oprema – 4. dio: Zaštitne nadstrešnice za skele (izvedbeni zahtjevi i projektiranje)
- HRN EN 12812 – Potporne skele (izvedbeni zahtjevi i projektiranje) i
- HRN EN 12813:2004 – Uvjeti za potporne tornjeve od predgotovljenih elemenata.

Prema HRN EN 12811-1 za modularne i cijevne skele zbog geometrijskih nelinearnosti (npr. mimoilaženje osi cijevi i nelinearnost spojnih elemenata) mora se koristiti nelinearna analiza, a za predgotovljene H elemente dozvoljena je uporaba linearne analize zbog malih geometrijskih nelinearnosti.

Opterećenja koja se prema navedenim normama obračunavaju u Hrvatskoj za proračun skela pokazana su u tablici 2.

**Tablica 2.** Osnovni tipovi opterećenja na skele

Opterećenja	Opis	Napomena
Stalno i korisno	Stalno opterećenje je od vlastite težine skele zajedno sa svom dodatnom opremom na skeli, a korisno opterećenje može biti od svježeg betona ili nekog drugog materijala (ovisi o funkciji skele).	Korisno opterećenje dolazi od težine materijala koji se nalazi na skeli i određuje se na osnovu zapremnine konstrukcije, tj. konstrukcijskih elemenata koje skela nosi i njihove zaprem. mase. Norma promjenjivo opterećenje za skele u građevinarstvu dijeli u razrede: inspekcijski radovi s vrlo laganom opremom, lagani radovi (kao bojanje ili čišćenje), opći građevinski radovi i teški građevinski radovi (npr. zidarski). Snijeg se u Hrvatskoj ne zahtjeva za obračun, a izračun pritiska vjetra ovisi o tome postavlja li se na skelu mreža ili platno/cerada (onda je pritisak veći i treba dodatno sidrenje u građevinu) ili na njoj nema nikakvih dodatnih elemenata. Za proračun je potrebno uzeti maks. opterećenje vjetrom prema lokaciji skele, ali maks. opterećenje vjetra određeno prema normi može se smanjiti do 30 % s obzirom na razdoblje kada će skela biti na određenoj lokaciji. Pokretna opterećenja skele ne uzimaju se u proračun istovremeno. Izračunavaju se samo najopterećeniji elementi i to prema stvarnoj tehnologiji izvođenja radova.
Promjenjivo	Promjenjivo je jednolično i koncentrirano opterećenje na radnim površinama i bočnoj konstrukciji (od radnika i mogućih alata koje koriste na skeli te od transportnih sredstava s materijalom koja se mogu kretati po skeli) te opterećenje od vjetra i snijega.	
Slučajno	Prema normi jedino je kao slučajno opterećenje definiran pritisak na ogradu u najnepovoljnijem položaju. No, može biti i od udara leda ili nanosa drveta ako je skela u vodotoku ili od udara vozila koja se kreću uz skelu.	

### 3.3. Postupanje kod montaže i demontaže prema pravilnicima o ZNR

Ovisno o složenosti skele, ovlaštena osoba mora izraditi plan njene montaže, uporabe i demontaže, što može biti i standardni plan dopunjen pojedinostima u svezi specifičnosti predmetne skele [18]. (Veliki proizvođači skela, kao npr. *Peri*, daju detaljne upute u vidu priručnika za njihovu sigurnu montažu.) Skele se smiju sastaviti, rastaviti ili bitno preinačiti (dopunjavati) samo prema tom planu i uz obvezni nadzor stručne osobe. Te radove mogu obavljati samo radnici (skelari, tesari) koji su prošli odgovarajuće stručno osposobljavanje, posebno na području posebnih rizika u svezi skele i mjera za njihovo sprječavanje. Prema Pravilniku o posebnim uvjetima rada poslovi podizanja skela i ograda kao i poslovi koji se izvode na visini većoj od 3 metra poslovi su s posebnim uvjetima rada. Radnici za te poslove

osim općih uvjeta za zasnivanje radnog odnosa moraju ispunjavaju još i posebne uvjete (glede psihofizioloških i psihičkih sposobnosti) koje se provjerava prije rasporeda na takve poslove i ponovno u propisanim rokovima [16]. Rad na visini zahtijeva dobre motoričke sposobnosti, dobar dubinski vid i psihičku stabilnost [19] jer takvi, zdravi radnici će u trenutku opasnosti moći odgovarajuće odreagirati i zaštititi se od mogućih ozljeda. Potrebna osobna zaštitna oprema na ovim poslovima je zaštitna kaciga, sigurnosni radni pojas i neklizajuća obuća.

Svaki element skele (naročito podni) mora se prije ugrađivanja dobro pregledati i svi oštećeni moraju se odvojiti. Npr. za sastavljanje se smiju potrebljavati samo ravne čelične cijevi, neoštećene hrđom, a drvene podnice moraju biti od dasaka debljine 48 mm koje nisu trule ni napuknute. Elementi tipske skele ne smiju se rezati, bušiti ili na drugi način oštećivati kako se s tim ne bi smanjila njihova nosivost i sigurnost.

Treba voditi računa da se skela montira na dozvoljenoj udaljenosti od elektrovodova i da je uzemljenjem zaštićena od udara groma. Prije postavljanja skele treba ukloniti sve prepreke koje bi to mogle ometati (npr. nadzemne vodove, grane drveća i drugu vegetaciju) i pripremiti teren, tj. podlogu (treba biti ravna, nabijena i po potrebi nasuta) [9]. Ako tlo nema dovoljnu nosivosti potrebno je napraviti podnožje koje omogućuje raspodjelu opterećenja na tlo.

Stupovi skele ne smiju se postavljati na balkone, istake na zgradi, nesigurne grede i sl. [8]. Nosivi dijelovi radne skele ne smiju se klizati. Moraju biti pričvršćeni za nosivu površinu ili se moraju osigurati uređajem protiv klizanja ili na neki drugi učinkoviti način. Pokretne skele moraju se učvrstiti protiv nekontroliranog pomicanja.

Skela mora biti stabilna. Svaka figura koja formira skelu mora biti nedeformabilna i svaki čvor u skeli mora biti osiguran, što znači da su spriječena pomicanja u sva tri pravca. Za povezivanje elemenata skele smiju se upotrebljavati samo tipska sredstva predviđena hrvatskim normama (čavli, vijci, klanfe, spojnice i dr.).

Zbog male širine i velike visine skele su prilično labilne i zato se moraju osigurati tako da su učvršćene protiv prevrtanja. Sidrenje u građevinu preuzima horizontalne sile koje djeluju na skelu kako ne bi dovele do njenog prevrtanja. Za sidrenje je dozvoljeno koristiti samo certificirani pribor i skela se smije sidriti samo u stabilne, čvrste dijelove građevine, što treba prije provjeriti. To npr. mogu biti stropne ploče, ali nikako ne žljebovi, olučne cijevi ili zidani parapeti. Upute proizvođača za *PERI UP Easy Fasadna skelu 67* nalažu da se za kontrolu sidrenja na mjestu primjene izvode probna opterećenja pomoću odgovarajućih kontrolnih uređaja. (Probno opterećenje mora biti 1,2 puta veće od tražene sile sidrenja i kada je sidrena podloga beton kontrola mora obuhvaćati barem 10 % svih primijenjenih učvrstnica, a kod drugog materijala barem 30 %, s najmanje pet probnih opterećenja [20].) Cijevna skela koja se zbog bilo kojeg razloga ne može na odgovarajući način usidriti u građevinu (na svakih 6 m u uzdužnom i poprečnom smjeru i pri vrhu povezati s nepokretnim objektom, tako da najviši radni pod na skeli bude maksimalno 1,5 m iznad najvišeg usidrenja) mora se od djelovanja horizontalnih sila osigurati prikladnom potpornom rešetkom.

Tijekom izrade skele mora se provjeravati vertikalnost i horizontalnost štapova, tj. cijevi. Svi vertikalni štapovi moraju biti i u uzdužnom i u poprečnom pravcu povezani i učvršćeni pomoću dijagonalnih veza postavljenih pod kutom od 45°. Zatezanje vijaka kod spojnica



mora se obavljati prema uputi proizvođača i s odgovarajućim alatom (momentnim ključevima), a ne pomoću cijevi (produživanjem ključeva) i sl.

Kada se postave podnice sljedeće etaže skele i radnici se popnu na nju prvo moraju postaviti odgovarajuću zaštitnu ogradu, jer sva radna mjesta viša od 100 cm od tla ili niže etaže, kod kojih postoji opasnost od pada, moraju biti zaštićena ogradom najmanje visine 100 cm. Na njoj trebaju biti najmanje tri vodoravne prečke čiji je razmak najviše 30 cm (35 cm ako su prečke od cijevi), a na donjem rubu ograde treba biti horizontala visine 15 - 20 cm kako bi spriječila pad predmeta na radnike dolje uz skelu [8]. Tek kada je gotova ta oграда smije se nastaviti s postavljanjem ostalih dijelova skele prema utvrđenom redosljedu.

Elementi poda moraju u potpunosti ispunjavati prostor između nosivih stupova. Između elemenata poda i vertikalne zaštite, kao i između skele i građevine na kojoj će se izvoditi radovi, ne smije biti opasnih otvora kroz koje radnik može propasti. Za razmak veći od 20 cm treba zaštitna oграда i s te strane.

Ljestve se trebaju čvrsto oslanjati na gornji i donji oslonac i moraju nadvisivati svoj gornji oslonac barem 75 cm, mjereno vertikalno od poda.

Vertikalni prijenos elemenata izvodi se s jednim radnikom na svakoj razini, a kada se skele postavljaju na više od 8 m visine treba koristiti odgovarajuće dizalice.

Ako nisu predviđene statičkim proračunom u projektu skele, priručne dizalice za beton i druge masivne terete ne smije se montirati na skelu, nego ih treba postaviti na građevinu koja je uz skelu [9].

Prilikom montaže, preinaka ili demontaže dijelovima skele koji nisu spremni za upotrebu mora se fizičkom preprekom (ogradom) spriječiti pristup radnika i na vidljivom mjestu znakovima općeg upozorenja označiti to kao opasno područje [18].

Kada se započne s demontažom ograde, radnici na skeli opet se moraju vezati sigurnosnim pojasom. Tamo gdje se pri demontaži skinu zaštitna oграда odmah treba ukloniti i radni pod, kako bi se onemogućilo kretanje nezaštićenim dijelom skele. Redosljed demontaže treba biti takav da se sidra skidaju nakon demontaže ostalih elemenata skele, a nakon uklanjanja posljednjih veza s građevinom do demontaže najdonje etaže skelu treba stabilizirati potpornim (kosim) šipkama. Demontirane elemente skele nikada se ne smije s visine bacati dolje, nego ih treba spuštati koloturnicima na nižu etažu i odgovarajućim sredstvima na tlo.

### 3.3. Mjere zaštite pri uporabi skela

Nakon montaže skele treba postaviti ploče sa sigurnosnim oznakama i znakovima upozorenja na pristup skeli. Kod skela okrenutih prema ulici moraju se poduzeti mjere za zaštitu prolaznika od padova predmeta (npr. spriječiti pad odgovarajućim ceradama i osigurati natkrivene prolaze), a u tom slučaju preporučljivo je skelske spojnice u dohvat prolaznika zaštititi jednostavnom, plastičnom ovojnicom.

Prilikom primopredaje skele monter je dužan njenom korisniku ukazati na moguće opasnosti u slučaju nepropisne primjene te na obveze zaštite od opasnosti.

Skela se smije koristiti samo za ono za što je predviđena, u skladu s njenim projektom. Mora se voditi brigu o ukupnom opterećenju na skeli kako se skela ne bi preopteretila. Zato se izbjegava istovremeni rad više struka radnika, odnosno više vrsta radova i više radnika na

skeli. Materijal se ne smije gomilati na skeli i mora biti uredno složen, tako da postoji nesmetan prolaz za radnike i da im je omogućen pristup na građevinu gdje je to potrebno (npr. na krov). Radni pod skele treba redovito čistiti od sitnog, otpadnog materijala.

Penjanje na skelu smije biti samo ljestvama ili stepenicama, a nije dozvoljeno penjanje po cijevima uz vanjsku stranu skele, niti provlačenje radnika između skele i građevine. Okomite ljestve fiksirane uz skelu dozvoljene su samo iznimno, ako vertikalna komunikacija nije drugačije moguća, i za 5 m i više potreban je leđobran (prema austrijskoj normi B 4007-2015) [21]. Prečke na ljestvama ne smiju biti mokre, zamašćene ili uprljane. Nakon prolaza radnika ljestvama obvezno treba zatvoriti otklopni dio podnice kroz koje je prošao.

Nije dozvoljeno neovlašteno uklanjati ograde i ostale dijelove skele [10]. Strogo je zabranjeno iskopavanje blizu mjesta oslanjanja skele, odnosno njeno potkopavanje, kao i loženje vatre ili držanje bilo kojeg drugog izvora povišene temperature u blizini skele.

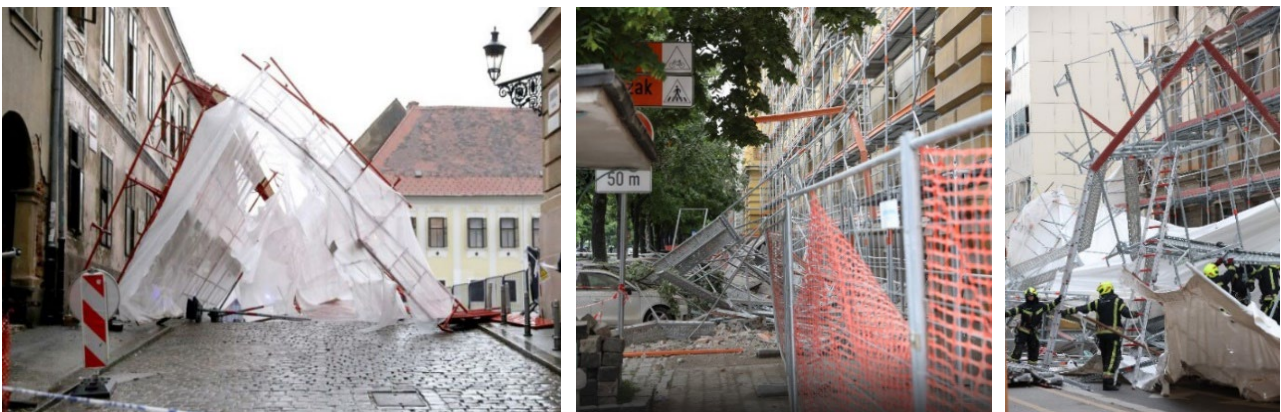
Metal je vodič struje i u slučaju istovremenog prolijevanja tekućine po strujnim vodovima i metalnom dijelu skele odmah je potrebno upozoriti sve radnike na skeli.

Ispravnost skele mora se od stručne osobe (voditelja građenja ili druge) provjeriti prije upotrebe i poslije redovito provjeravati, najmanje jedanput mjesečno, ali i nakon dužeg vremena u kojem se skela nije koristila, poslije oštećenja, nekih prepravki (npr. promjene visine ili proširenja skele), vremenskih nepogoda, seizmičkog podrhtavanja i drugih djelovanja koja su mogla ugroziti stabilnost skele. Stanje skele ocjenjuje se kroz kontrolni list skele, a sve se evidentira u kontrolnu knjigu skele, uz ovjeru ovlaštene osobe na gradilištu. Sva dokumentacija skele mora se čuvati na gradilištu do njene demontaže [9].

#### 4. Opasnosti i propusti koji dovode do nezgoda

Zbog visine najveći su rizici po radnike na skelama od padova i udaraca predmetima [22], te rizici od padova alata i drugog sa skele na radnike.

Postoje opasnosti od rušenja skele, od pokliznuća na podu skele, zapinjanja na odložene predmete, propadanja kroz otvore na podu skele ili otvore između skele i zida i od pucanja radnog poda [9]. Uzrok rušenja skela može biti jak vjetar i nedovoljno ili nepravilno sidrenje. Kod starih zgrada oštećenih potresom može se dogoditi da nije dobro poznata stabilnost i čvrstoća elemenata u koje se skela sidri. Na slici 3. su tri slučaja srušenih skela u Zagrebu u posljednje dvije godine.



**Slika 3.** Srušene skele u centru Zagreba 2023. i 2024. godine [23] [24]

Kod skela od drvenih materijala veze teže osiguravaju standardiziranu nosivost i sigurnost uporabe. Općenito, opasnost se povećava zbog loše organizacije rada, slabije stručnosti uključenih djelatnika i manjeg poštivanja mjera zaštite na radu te visine objekta i težih uvjeta rada [25] (npr. vjetar i slabija vidljivost). Pogreške koje dovode do nesreća na našim gradilištima su rad na nedovršenoj skeli, nestručno postavljene skele, korištenje skela u pogrešnu namjenu i preopterećenje skele, popuštanje nosivosti elemenata skele (npr. usljed slabo održavanih spojnika), neuređenost površina za rad i kretanje na skeli (skliske, loše odloženi predmeti i sl.), penjanje po cijevima ili po neosiguranim ljestvama i kretanje radnika po površinama skele bez propisane zaštitne ograde, neodgovarajuće podizanje materijala na skelu i spuštanje s nje, nekorištenje osobne zaštitne opreme, nepostavljanje sigurnosnih znakova i drugo nepoštivanje pravila za sigurnost na radu [2] [9]. Posebno su opasne razne improvizacije kao što je preinaka skela bez projekta (na „svoju ruku“), korištenje neodgovarajućih, neoriginalnih ili oštećenih dijelova skele i neprikladnih alata za njihovo spajanje i opreme za sidrenje. Sitni inventar na gradilištima se često gubi i oštećuje usljed nepravilnog, nepažljivog rukovanja i manipulacije, pa ga onda nedostaje.

Prema nadležnoj inspekciji čak 90 % skela u Hrvatskoj obuhvaćenih nadzorom u 2018. godini bilo je neispravno [2]. Slika 4. pokazuje loše primjere skela kakvi se vrlo često mogu vidjeti na našim gradilištima (nedostatak zaštitnih ograda, loše podnice, nepravilno oslanjanje na tlo i dr.).



**Slika 4.** Skele koje nisu u skladu s propisanim pravilima za siguran rad

Stručnjaci u praksi smatraju da na razinu sigurnosti na gradilištima općenito loše utječe nedovoljna detaljnost u propisima definiranih obveza koordinatora ZNR u fazi izvođenja i njihove slabe ovlasti [26]. U novije vrijeme kod nas je izražen problem komunikacije sa sve više stranih radnika koji ne znaju dobro hrvatski jezik, a upitna je i njihova upućenost u propise koji vrijede u EU.

## 5. Zaključak

Kod skela u građevinarstvu zbog visine su moguće opasne ozljede ljudi i značajne štete na imovini. Rizik se mora eliminirati ili umanjiti na prihvatljivu mjeru poduzimanjem odgovarajućih, preventivnih mjera. Većinu opasnosti koje se javljaju radnici mogu i moraju

sami uočiti i spriječiti nezgode. No, uz samu prirodu posla sa i na skelama kod nas je izražen problem zanemarivanja pravila ZNR. Zakonski i podzakonski akti u Hrvatskoj dobro definiraju područje ZNR, ali umjesto da se još teži mjerama za dodatno smanjivanje rizika kod skela (kao u nekim razvijenijim državama) i postojeći propisi se u praksi često zaobilaze. Snalažljivost na gradilištima je poželjna, ali improvizacije ponekad mogu biti vrlo opasne. S obzirom da do padova najčešće dolazi ako radna oprema nije ispravna ili se ne koristi na odgovarajući način, potrebno je podizati razinu stručnih znanja i vještina radnika za siguran rad i više ih (učestalo, a najbolje neposredno prije samog rada) upozoravati na opasnosti na poslu. Također, važna je dobra koordinacija svih uključenih u rad na i sa skelama ili u blizini skela. Svi sudionici u procesu građenja, osim što trebaju biti upoznati s opasnostima i rizicima po zdravlje i materijalne štete, trebaju biti svjesni i da rad na propisani način zapravo donosi uštede (iako se nekada suprotno postupanje u početku čini brže i jeftinije) jer će tako rad radnika biti produktivniji, a uz to skele imati duži vijek uporabe.

## 6. Literatura

- [1] Opći tehnički uvjeti za radove za radove u vodnom gospodarstvu. Zagreb: Hrvatske vode, 2022.
- [2] Tokić, Stipo. Hrvatska iskustva pri radu sa skelama // *Prezentacija IX. savjetovanje Zaštita na radu u regiji Alpe – Jadran / Opatija*, 2019. <https://znr-alpe-jadran.zirs.hr/prezentacije/> (Pristupljeno 2. 6. 2024.)
- [3] Vidaković, Držislav; Brana, Petar, Španić, Martina. Risk and Cost of Injury in Construction Company // *Proceedings of CIB Joint International Symposium 2009 / Cerić, Anita; Radujković, Mladen (ur.)*. (ISBN 978-953-6272-34-1). Dubrovnik : Građevinski fakultet u Zagrebu, 27-30.09.2009., str. 612-621.
- [4] Mayer, Beate. Statistika o ozljedama na radu u Austriji // *Prezentacija 24. Konferencija zaštite na radu / Zagreb*, 2019. <https://skup-znr.zirs.hr/prezentacije/#prezentacije-sa-skupa-2019> (Pristupljeno 5. 7. 2024.)
- [5] Vatrozaštita doo. Zaštita od pada u građevinarstvu, 2021. <https://vatrozastita.com/zastita-od-pada-u-gradjevinarstvu/> (Pristupljeno 5. 7. 2024.)
- [6] Analiza ozljeda na radu u djelatnosti F – Građevinarstvo za 2022. godinu. Zagreb: Hrvatski zavod za javno zdravstvo, 2024.
- [7] Pap, Đuro. Stanje zaštite na radu u 2018. godini // *Sigurnost*, 61(2019), 3; 287-302. (ISSN 1848-6347)
- [8] Pravilnik o zaštiti na radu u građevinarstvu // *Službeni list*, (1968), 42, <https://www.arhitekti-hka.hr/hr/zakoni-propisi/popis/zastita-rad/> (Pristupljeno 5. 6. 2024.)
- [9] Uporaba i siguran rad sa skelama. Zagreb: Ministarstvo rada, mirovinskog sustava, obitelji i socijalne politike, 2021.
- [10] Fatović, Sunčana. Uporaba i siguran rad sa skelama – s naglaskom na zaštitu zdravlja i sigurnost na radu u kontekstu obnove Grada Zagreba i Banovine // *Prezentacija Stručni skup: Uporaba i siguran rad sa skelama – s naglaskom na zaštitu zdravlja i sigurnost na radu u kontekstu obnove Grada Zagreba i Banovine / Zagreb*, 2022.

[https://uznr.mrms.hr/wp-content/uploads/prezentacije/skele\\_01\\_06\\_22/Skele%20Sun%C4%8Dana%20Fatovi%C4%87.pdf](https://uznr.mrms.hr/wp-content/uploads/prezentacije/skele_01_06_22/Skele%20Sun%C4%8Dana%20Fatovi%C4%87.pdf) (Pristupljeno 10. 7. 2024.)

- [11] Damjanović, Dragan. Stari vukovarski vodotoranj iz 1913. godine // *Građevinar*, 61(2009), 8; 731-736. (ISSN 1333-9095)
- [12] Čular, Nedjeljko. Projektiranje skela prema Europskim normama // *Prezentacija Savjetovanje uporaba skele u građevinarstvu / Zagreb*, 2018. [https://uznr.mrms.hr/wp-content/uploads/prezentacije/skele\\_prosco\\_15\\_03\\_18/Nedjeljko\\_Cular\\_15\\_03\\_2018.pdf](https://uznr.mrms.hr/wp-content/uploads/prezentacije/skele_prosco_15_03_18/Nedjeljko_Cular_15_03_2018.pdf) (Pristupljeno 7. 7. 2024.)
- [13] Aničić, Dražen. Zagrebačka katedrala u potresu 1880. i njezina današnja obnova // *Građevinar*, 52(2000), 11; 655-661. (ISSN 1333-9095)
- [14] Mehkek, Goran (fotografije). Skele koje život znače // *Jutarnji list*, (2020)
- [15] Učur, Marinko Đ.; Krišto, Ivana; Kovač, Cvetan. Opća načela zakonodavstva EU-a o zaštiti zdravlja i sigurnosti na radu // *Sigurnost*, 64(2022), 4; 359-378. (ISSN 1848-6347)
- [16] Hrvatski Sabor. Zakon o zaštiti na radu // *Narodne novine*, (2014), 71 (ISSN 1333-5618)
- [17] Farysha Ameena, Dania. Basic of Scaffolding - Understanding the Role and Importance of Scaffolding in Construction, 2023. <https://en.scaffold.my/post/scaffolding-construction-maintenance-ii> (Pristupljeno 12. 7. 2024.)
- [18] Hrvatski Sabor. Pravilnik o zaštiti na radu pri uporabi radne opreme // *Narodne novine*, (2017), 18 (ISSN 1333-5618)
- [19] Ećimović Nemarnik, Renata. Ocjena radne sposobnosti pri radu na visini u zemljama EU-a 2023. // *Sigurnost*, 65(2023), 3; 345-348. (ISSN 1848-6347)
- [20] Peri. Easy Fasadna skela 67 Upute za primjenu i montažu – Standardna izvedba, (2018), 4, <https://www.peri.rs> (Pristupljeno 20. 7. 2024.)
- [21] Stuhlinger, Ernest. Austrijska iskustva pri radu na skelama // *Prezentacija IX. savjetovanje Zaštita na radu u regiji Alpe – Jadran / Opatija*, 2019 <https://znr-alpe-jadran.zirs.hr/wp-content/uploads/2019/04/Austrijska-iskustva-pri-radu-na-skelama-Ernest-St%C3%BChlinger.pdf> (Pristupljeno 12. 7. 2024.)
- [22] Webb, Anthony. Scaffolding Safety Knowledge and Solutions. MCR Safety, <https://www.mcrcsafety.com/blog/scaffolding> (Pristupljeno 22. 6. 2024.)
- [23] Macek, Patrik (fotografija). Olujni vjetar srušio skelu na Markovu trgu, pala je tik do zgrade Sabora // *Telegram*, (2023)
- [24] Kristo, Timislav (fotografija). Srušila se ogromna građevinska skela u centru Zagreba // *Jutarnji list*, (2024)
- [25] Pavlović, Milan, Učur, Marinko. Zaštita na radu - provedbeni propisi s komentarima i tumačenjima. Zagreb: TIM press, 2009. (ISBN 978-953-7177-28-7)
- [26] Mihić, Matej. Kako povećati razinu sigurnosti na gradilištima? // *Građevinar*, 76(2024), 5; 471-475. (ISSN 1333-9095)

# Ozljede na radu u građevinarstvu i zaštita na radu *Injuries at Work in Civil Engineering and Occupational Safety*

D. Obradović<sup>1,\*</sup>, S. Obradović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Osijek, Hrvatska

<sup>2</sup>Dom zdravlja Osječko-baranjske županije, Osijek, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [dobradovic@gfos.hr](mailto:dobradovic@gfos.hr)

## Sažetak

Provedba zaštite na radu vrlo je složena jer obuhvaća jako puno aspekata, ima puno uključenih, a za pravilno provođenje potrebno je poznavati mnogo zakonskih i podzakonskih propisa. Zaštita na radu obuhvaća sustav pravila, načela, mjera, postupaka i aktivnosti koji se organizirano primjenjuju kako bi se osigurala sigurnost i zaštita zdravlja na radu. Cilj je smanjenje rizika na radu, prevencija ozljeda na radu, profesionalnih bolesti i bolesti povezanih s radom, te sprječavanje materijalnih i nematerijalnih šteta na radu. Prikazat će se propisi koje je potrebno poznavati. Pojam ozljede na radu će se definirati i navesti postupak prijave u slučaju da se ona dogodi. Za Republiku Hrvatsku kratko će se prezentirati analiza ozljeda na radu za razdoblje od 2015. do 2023. godine. Prikazat će se stopa ozljeda prema Nacionalnoj klasifikaciji djelatnosti 2007. - NKD 2007. za područje F Građevinarstvo.

**Ključne riječi:** građevinarstvo, ozljede na radu, pravni propisi, zaštita na radu

## Abstract

The implementation of occupational safety is very complex because it encompasses many aspects, involves many stakeholders, and requires knowledge of numerous legal and sub-legal regulations for proper implementation. Occupational safety includes a system of rules, principles, measures, procedures, and activities that are systematically applied to ensure safety and health protection at work. The goal is to reduce risks at work, prevent work-related injuries and occupational and work-related diseases, as well as prevent material and non-material damages at work. It will be presented the regulations that need to be known. The term injury at work will be defined, and the reporting procedure in case it occurs will be defined. An analysis of injuries at work in the Republic of Croatia will be briefly presented for the period from 2015 to 2023. The work injury rate according to the National Classification of Economic Activities 2007 (NKD 2007) for the F Construction industry sector will be presented.

**Key words:** civil engineering, injuries at work, legal regulations, occupational safety



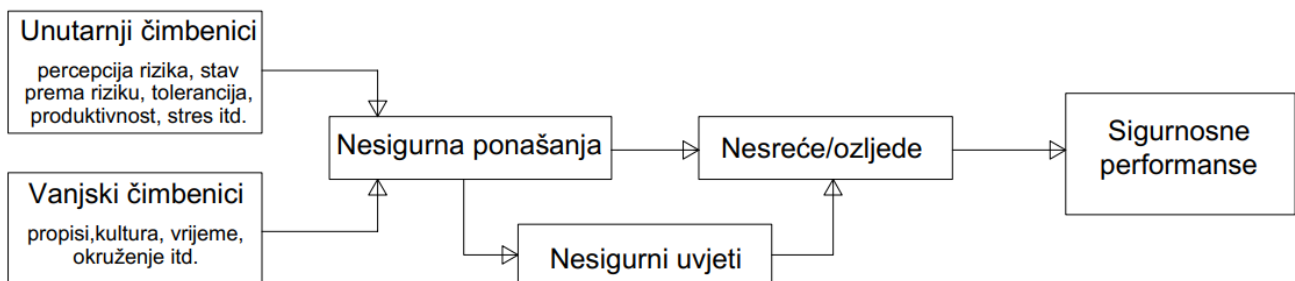
## 1. Uvod

Zaštita na radu je vrlo važna kako bi se spriječile ozljede na radu, odnosno kako bi se svele na najmanju moguću mjeru. Prema Zakonu o zaštiti na radu (NN 71/14, 118/14, 154/14, 94/18, 96/18), pojam zaštite na radu definiran je na sljedeći način: „Zaštita na radu je sustav pravila, načela, mjera, postupaka i aktivnosti, čijom se organiziranom primjenom ostvaruje i unapređuje sigurnost i zaštita zdravlja na radu, s ciljem sprječavanja rizika na radu, ozljeda na radu, profesionalnih bolesti, bolesti u vezi s radom te ostalih materijalnih i nematerijalnih šteta na radu i u vezi s radom“ [1].

Zaštita na radu ima ključnu ulogu u svim industrijama jer zdravi radnici predstavljaju temeljni resurs svake organizacije. Poslodavci su zakonski i moralno obvezni brinuti o sigurnosti i zdravlju radnika na radnom mjestu, kako bi se osiguralo da se radnici vrate s posla živi i zdravi. Ovo je posebice važno u građevinskom sektoru [2].

Razvoj kulture proaktivne sigurnosti zaštite na radu može potrajati dugo i zahtijevati velike troškove za planiranje, istraživanje i implementaciju na svakoj razini unutar organizacije. Međutim, to je vrijedno ulaganja jer su zdravlje i život neprocjenjivi. Nakon što se implementira, može se postići konkurentna prednost, kvaliteta, pouzdanost i profitabilnost unutar organizacije [3].

Teoretski, unutarnji čimbenici radnika kao što su stav, percepcija i učinkovitost igraju ključnu ulogu u sigurnosnoj izvedbi. Kao glavne razloge nesreća u građevinarstvu prepoznati su nesigurno ponašanje i nesigurni uvjeti (Slika 1.).



**Slika 1.** Opći model uzroka nesreće [4]

Među ova dva, nesigurni uvjeti mogu biti rezultat pogrešne uporabe opreme ili nedovoljno dobrog upravljanja. Dokazano je da se razlozi nesigurnog ponašanja mogu objasniti s dva aspekta:

- 1) unutarnji čimbenici što znači osobne karakteristike, kao što su percepcija rizika, stav prema riziku, tolerancija na rizik, produktivnost i stres [4–7] te
- 2) vanjski čimbenici, koji se odnose na okruženje u kojem pojedinci žive, kao što su kultura, propisi i vrijeme [4,8–10].

Najčešće opasnosti koje rezultiraju ozljedama jesu padovi, udari stroja ili materijala u radnika, prignječenja i strujni udar [2]. Nesreće uzrokuju ljudsku patnju i ekonomske gubitke. Izračun stvarnih troškova ozljeda otkriva da ugrožavanje sigurnosti rezultira povećanim troškovima i smanjenom dobiti [11,12].

## 2. Propisi u zaštiti na radu

Kao najbolji pokazatelj propisa koje je potrebno poznavati kod obavljanja zaštite na radu može se navesti preporučena literatura za polaganje stručnog ispita za stručnjaka zaštite na radu i koordinatora zaštite na radu.

Popis literature koji slijedi u nastavku je preuzet (i ako je bilo potrebno aktualiziran s novim brojevima Narodnih novina) sa službene mrežne stranice Ministarstva rada, mirovinskoga sustava, obitelji i socijalne politike [13], odnosno iz programa stručnog ispita koji se nalazi u Pravilniku o osposobljavanju i usavršavanju iz zaštite na radu te polaganju stručnog ispita (NN 142/21) [14].

Propisi su sljedeći:

- Zakon o zaštiti na radu (NN 71/14, 118/14, 154/14, 94/18, 96/18)
- Pravilnik o izradi procjene rizika (NN 112/14, 129/19)
- Ustav RH (NN 56/90, 135/97, 08/98, 113/00, 124/00, 28/01, 41/01, 55/01, 76/10, 85/10, 05/14) – odabrani članci
- Zakon o radu (NN 93/14, 127/17, 98/19, 151/22, 46/23, 64/23)
- Zakon o mirovinskom osiguranju (NN 157/13, 151/14, 33/15, 93/15, 120/16, 18/18, 62/18, 115/18, 102/19, 84/21, 119/22) – odabrani članci
- Zakon o obveznom zdravstvenom osiguranju (NN 80/13, 137/13, 98/19, 33/23) – odabrani članci
- Zakon o obveznim odnosima (NN 35/05, 41/08, 125/11, 78/15, 29/18, 126/21, 114/22, 156/22, 155/23) – odabrani članci
- Pravilnik o zaštiti na radu za mjesta rada (NN 105/20)
- Pravilnik o zaštiti na radu na privremenim gradilištima (NN 48/18)
- Pravilnik o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu (NN 148/23)
- Pravilnik o zaštiti radnika od izloženosti vibracijama na radu (NN 148/23)
- Pravilnik o sigurnosnim znakovima (NN 91/15, 102/15, 61/16)
- Pravilnik o zaštiti na radu radnika izloženih statodinamičkim, psihofiziološkim i drugim naporima na radu (NN 73/21)
- Pravilnik o zaštiti na radu pri uporabi radne opreme (NN 18/17)
- Pravilnik o pregledu i ispitivanju radne opreme (NN 16/16, 120/22)
- Pravilnik o ispitivanju radnog okoliša (NN 16/16, 120/22)
- Pravilnik o najmanjim zahtjevima za unapređenje sigurnosti i zaštite zdravlja radnika zaposlenih u naftnom rudarstvu (NN 40/07)
- Pravilnik o najmanjim zahtjevima za unapređenje sigurnosti i zaštite zdravlja radnika zaposlenih u rudarstvu kod površinskih i podzemnih rudarskih radova (NN 40/07)
- Pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom (NN 88/12)
- Pravilnik o najmanjim zahtjevima sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te tehničkom nadgledanju postrojenja, opreme, instalacija i uređaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom (NN 39/06 i 106/07, 71/14)
- Pravilnik o uporabi osobne zaštitne opreme (NN 5/21)

- Pravilnik o zaštiti radnika od izloženosti opasnim kemikalijama na radu, graničnim vrijednostima izloženosti i biološkim graničnim vrijednostima (NN 91/18, 1/21, 148/23)
- Pravilnik o zaštiti radnika od rizika zbog izlaganja azbestu (NN 40/07)
- Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada (NN 5/84)
- Pravilnik o zaštiti radnika od rizika zbog izloženosti biološkim štetnostima na radu (NN 129/20).

Međutim, kako se u radu govori o ozljedama na radu u građevinarstvu i zaštiti na radu, potrebno se osvrnuti na posao koordinatora zaštite na radu.

Kako se navodi u Zakonu o zaštiti na radu (NN 71/14, 118/14, 154/14, 94/18, 96/18) [1], članku 73., stavku 4. potrebno je da „Investitor, vlasnik građevine, koncesionar ili druga osoba za koju se izrađuje glavni projekt, mora imenovati jednog ili više koordinatora zaštite na radu tijekom izrade projekta i tijekom građenja kada radove izvode ili je predviđeno da ih izvode dva ili više izvođača [1].“

Propisi koje koordinatore zaštite na radu tijekom izrade projekta i tijekom građenja treba poznavati su sljedeći [13]:

- Zakon o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19)
- Zakon o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje (NN 78/15, 118/18, 110/19)
- Zakon o postupanju s nezakonito izgrađenim zgradama (NN 86/12, 143/13, 65/17, 14/19)
- Zakon o građevinskoj inspekciji (NN153/13)
- Uredba o određivanju građevina, drugih zahvata u prostoru i površina državnog i područnog (regionalnog) značaja (NN 37/14, 154/14, 30/21, 72/22)
- Tehnički propis o osiguranju pristupačnosti građevina osobama s invaliditetom i smanjene pokretljivosti (NN 12/23)
- Pravilnik o jednostavnim i drugim građevinama i radovima (NN 112/17, 34/18, 36/19, 98/19, 31/20, 74/22, 155/23)
- Pravilnik o sadržaju i izgledu ploče kojom se označava gradilište (NN 42/14)
- Pravilnik o sadržaju pisane Izjave izvođača o izvedenim radovima i uvjetima održavanja građevine (NN 43/14)
- Pravilnik o načinu provedbe stručnog nadzora građenja, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera (NN 131/21, 68/22)
- Napatuk o načinu rada građevinske inspekcije (NN 109/23)
- Pravilnik o održavanju građevina (NN 122/14, 98/19)
- Pravilnik o stručnom ispitu osoba koje obavljaju poslove graditeljstva i prostornoga uređenja (NN 129/15).



### 3. Pojam ozljede na radu i prijava iste

Pojam ozljede na radu dan je u Zakonu o obveznom zdravstvenom osiguranju (NN 80/13, 137/13, 98/19, 33/23), članku 66. koji glasi:

1. „ozljeda izazvana neposrednim i kratkotrajnim mehaničkim, fizikalnim ili kemijskim djelovanjem te ozljeda prouzročena naglim promjenama položaja tijela, iznenadnim opterećenjem tijela ili drugim promjenama fiziološkog stanja organizma, ako je uzročno vezana uz obavljanje poslova, odnosno djelatnosti na osnovi koje je ozlijeđena osoba osigurana u obveznom zdravstvenom osiguranju, kao i ozljeda nastala tijekom obveznoga kondicijskog treninga vezanog uz održavanje psihofizičke spremnosti za obavljanje određenih poslova, sukladno posebnim propisima,
2. bolest koja je nastala izravno i isključivo kao posljedica nesretnog slučaja ili više sile za vrijeme rada, odnosno obavljanja djelatnosti ili u vezi s obavljanjem te djelatnosti na osnovi koje je osigurana osoba osigurana u obveznom zdravstvenom osiguranju,
3. ozljeda nastala na način iz točke 1. ovoga članka koju osigurana osoba zadobije na redovitom putu od stana do mjesta rada i obratno te na putu poduzetom radi stupanja na posao koji joj je osiguran, odnosno na posao na osnovi kojeg je osigurana u obveznom zdravstvenom osiguranju,
4. ozljeda, odnosno bolest iz točaka 1. i 2. ovoga članka koja nastane kod osigurane osobe u okolnostima iz članka 16. ovoga Zakona“ [15].

Također, Zakon o mirovinskom osiguranju (NN 157/13, 151/14, 33/15, 93/15, 120/16, 18/18, 62/18, 115/18, 102/19, 84/21, 119/22) definira pojam ozljede na radu, a koji se navodi u članku 42., stavcima 1. do 6. Tako stavci 1. do 3. navode da je ozljeda na radu sljedeće:

1. „ozljeda osiguranika izazvana neposrednim i kratkotrajnim mehaničkim, fizikalnim ili kemijskim djelovanjem te ozljeda uzrokovana naglim promjenama položaja tijela, iznenadnim opterećenjem tijela ili drugim promjenama fiziološkog stanja organizma, ako je takva ozljeda uzročno vezana uz obavljanje poslova na kojima radi, odnosno djelatnosti na osnovi koje ozlijeđena osoba ima svojstvo osiguranika prema ovome Zakonu.
2. bolest osiguranika koja je nastala izravno i isključivo kao posljedica nekog nesretnog slučaja ili sile za vrijeme rada, odnosno za vrijeme obavljanja djelatnosti ili u vezi s obavljanjem te djelatnosti na osnovi koje oboljela osoba ima svojstvo osiguranika prema ovome Zakonu.
3. ozljeda nanesena na način naveden u točki 1. ovoga članka koju osiguranik pretrpi na redovitom putu od mjesta stanovanja do mjesta rada i obratno, te na putu poduzetom radi stupanja na posao koji mu je osiguran, odnosno na posao na osnovi kojega je osiguran“ [16].

Postupak prijave ozljede na radu, odnosno utvrđivanje i priznavanje iste pokreće se podnošenjem tiskanice „Prijava o ozljedi na radu“ regionalnom uredu Hrvatskog zavoda za zdravstveno osiguranje (HZZO).

Tiskanica Prijave o ozljedi na radu sastoji se od sljedećih dijelova:

- A) podaci o poslodavcu

- B) podaci o ozlijeđenoj osobi
- C) podaci o ozljedi na radu
- D) podaci o neposrednom rukovoditelju
- E) podaci o očevidcu
- F) podaci o osobi koja je popunila tiskanicu prijave o ozljedi na radu
- G) izvješće izabranog doktora opće/obiteljske medicine
- H) Hrvatski zavod za zdravstveno osiguranje [17].

Liječnik obiteljske medicine ispunjava tiskanicu Prijava o ozljedi na radu, dio G – izvješće izabranog doktora opće/obiteljske medicine. Pacijent s ispunjenim ostalim dijelovima tiskanice te medicinskom dokumentacijom, najčešće s hitnog prijema dolazi liječniku obiteljske medicine kako bi liječnik odredio dijagnozu ozljede, naziv i šifru prema važećoj Međunarodnoj klasifikaciji bolesti i srodnih zdravstvenih problema (MKB) te vanjski uzrok ozljede prema MKB.

Primjerice, radnik na skeli pao je prilikom obavljanja posla koji mu je zadao poslodavac te se ozlijedio. Javio se na hitni prijem gdje je obradom utvrđeno da je slomio gležanj. Od poslodavca je dobio tiskanicu Prijava o ozljedi na radu čije je dijelove od A - F ispunio poslodavac te je radnik također dao pisanu izjavu kako se događaj dogodio. Unutar 8 dana pacijent se javlja liječniku s Tiskanicom koji ispunjava svoj dio „G“. Upisuje ime i prezime doktora koji je pregledao ozlijeđenu osobu, naziv i adresu zdravstvene ustanove u kojoj je prvi puta pregledana ozlijeđena osoba. Određuje se dijagnoza ozljede te vanjski uzrok ozljede prema MKB. Primjerice, u ovom slučaju dijagnoza je S92.1 prijelom gležnanske kosti (talusa) [18,19] te W 12.0 –pad na skelu ili s nje [18] kao vanjski uzrok ozljede. Određuje se boluje li osoba od drugih bolesti koje su za posljedicu mogle imati ozljedu. Također se upisuje boluje li ozlijeđena osoba od fizičkih ili psihičkih poteškoća koje su utjecale na nastanaka ozljede. Upisuje se je li izvršeno testiranje na alkohol ili druga opojna sredstva, datum popunjavanja prijave te ime prezime, potpis te šifra izabranog doktora.

Radnik se poslodavcu javlja s ispunjenom Tiskanicom od strane liječnika te poslodavac istu šalje u Regionalni ured HZZO-a zajedno s izjavom osigurane osobe o nastanku ozljede te medicinskom dokumentacijom vezanom za prijavljenu ozljedu na radu. HZZO određuje hoće li prijavljena ozljeda na radu biti priznata ili ne.

Ako ozljeda bude priznata kao ozljeda na radu, HZZO joj dodjeljuje evidencijski broj priznate ozljede na radu koju upisuje na za to predviđeno mjesto u dijelu „H“ Tiskanice koju HZZO poštom šalje poslodavcu i izabranom liječniku. Liječnik upisuje evidencijski broj priznate ozljede na radu u e-zdravstveni karton pacijenta te ga povezuje s MKB šifrom odnosno dijagnozom ozljede. Pacijentu se izdaje novo izvješće o privremenoj nesposobnosti za rad koje se sada vodi kao B0 – Ozljeda na radu. Pacijent tada ima pravo na naknadu plaće u iznosu od 100 % od osnovice koja se isplaćuje na teret sredstava HZZO-a.

#### 4. Prikaz analiza ozljeda na radu u Republici Hrvatskoj

Ovaj dio rada prikazuje broj prijavljenih ozljeda na radu prema djelatnosti poslodavca sukladno Nacionalnoj klasifikaciji djelatnosti 2007. - NKD 2007 [20].

NKD 2007. razlikuje 21 djelatnost poslodavca, a kako je prikazano u tablici 1.



**Tablica 1.** Prikaz oznaka prema NKD 2007. [20]

Slovna oznaka	Naziv gospodarske djelatnosti
<b>A</b>	Poljoprivreda, šumarstvo i ribarstvo
<b>B</b>	Rudarstvo i vađenje
<b>C</b>	Prerađivačka industrija
<b>D</b>	Opskrba električnom energijom, plinom, parom i klimatizacija
<b>E</b>	Opskrba vodom; uklanjanje otpadnih voda, gospodarenje otpadom te djelatnosti sanacije okoliša
<b>F</b>	Građevinarstvo
<b>G</b>	Trgovina na veliko i na malo; popravak motornih vozila i motocikala
<b>H</b>	Prijevoz i skladištenje
<b>I</b>	Djelatnosti pružanja smještaja te pripreme i usluživanja hrane
<b>J</b>	Informacije i komunikacije
<b>K</b>	Financijske djelatnosti i djelatnosti osiguranja
<b>L</b>	Poslovanje nekretninama
<b>M</b>	Stručne, znanstvene i tehničke djelatnosti
<b>N</b>	Administrativne i pomoćne uslužne djelatnosti
<b>O</b>	Javna uprava i obrana; obvezno socijalno osiguranje
<b>P</b>	Obrazovanje
<b>Q</b>	Djelatnosti zdravstvene zaštite i socijalne skrbi
<b>R</b>	Umjetnost, zabava i rekreacija
<b>S</b>	Ostale uslužne djelatnosti
<b>T</b>	Djelatnosti kućanstava kao poslodavaca
<b>U</b>	Djelatnosti izvanteritorijalnih organizacija i tijela

U tablici 2. prikazan je ukupan broj ozljeda na radu prema djelatnosti poslodavca (NKD 2007.) za razdoblje od 2015. do 2023. godine, dok tablica 3. prikazuje stopu ukupnih ozljeda na radu na 1000 zaposlenih za područje F Građevinarstvo za isto razdoblje.

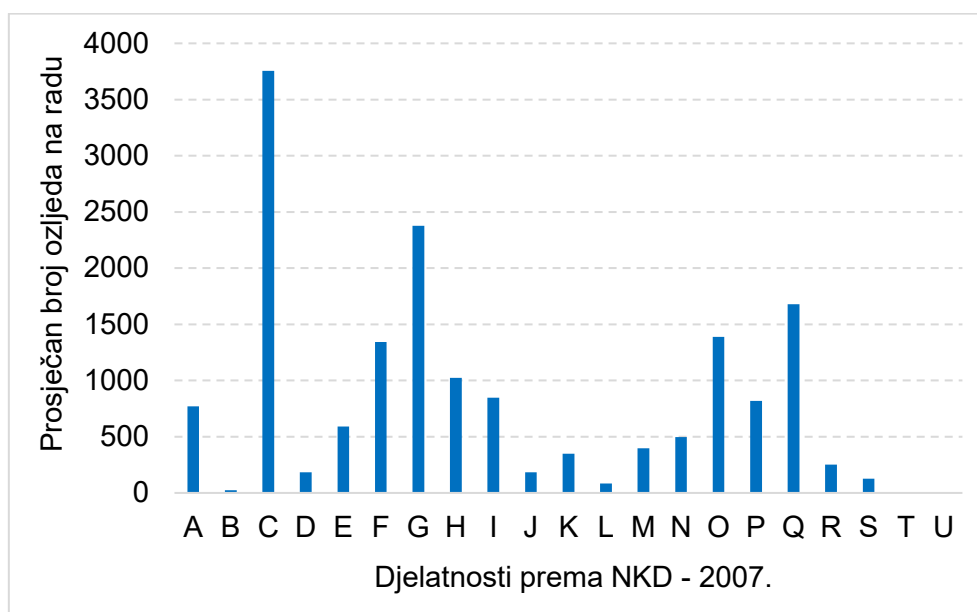
**Tablica 2.** Broj prijavljenih ozljeda na radu prema djelatnosti poslodavca za razdoblje od 2015. do 2023. godine (izrada autora prema [21–29])

NKD 2007.	Godina								
	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2021.	2022.	2023.
<b>A</b>	673	667	707	878	857	775	784	832	751
<b>B</b>	24	22	23	27	22	32	24	27	11
<b>C</b>	3430	3627	4139	4394	4086	3319	3595	3478	3737
<b>D</b>	215	198	192	176	212	150	162	175	161
<b>E</b>	509	527	571	586	617	539	566	690	724
<b>F</b>	1105	1143	1348	1570	1510	1313	1392	1379	1320
<b>G</b>	2341	2339	2514	2545	2510	2124	2321	2295	2396

nastavak tablice 2.

	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2021.	2022.	2023.
H	1107	978	1002	1139	1065	849	1001	987	1074
I	752	806	925	963	1007	525	700	907	1040
J	208	186	204	208	220	142	139	163	177
K	365	345	385	415	447	289	280	278	339
L	101	146	126	73	87	47	54	53	56
M	273	337	380	387	439	382	423	426	532
N	550	523	610	618	541	372	401	405	441
O	1475	1504	1597	1583	1394	1140	1153	1328	1310
P	795	822	883	936	883	578	719	837	924
Q	1660	1676	1810	1775	1830	1535	1525	1641	1664
R	297	258	223	287	244	209	220	266	261
S	127	120	112	153	157	100	115	118	141
T	2	3	3	2	2	-	4	1	5
U	4	5	6	3	1	2	3	3	4

Na slici 2., za razdoblje od 2015. do 2023. godine, izračunan je i prikazan prosječni godišnji broj prijavljenih ozljeda na radu po svakoj od djelatnosti prema NKD – 2007.



**Slika 2.** Prosječan godišnji broj ozljeda na radu prema djelatnosti poslodavca za razdoblje od 2015. do 2023. godine (izrada autora prema [21–29])

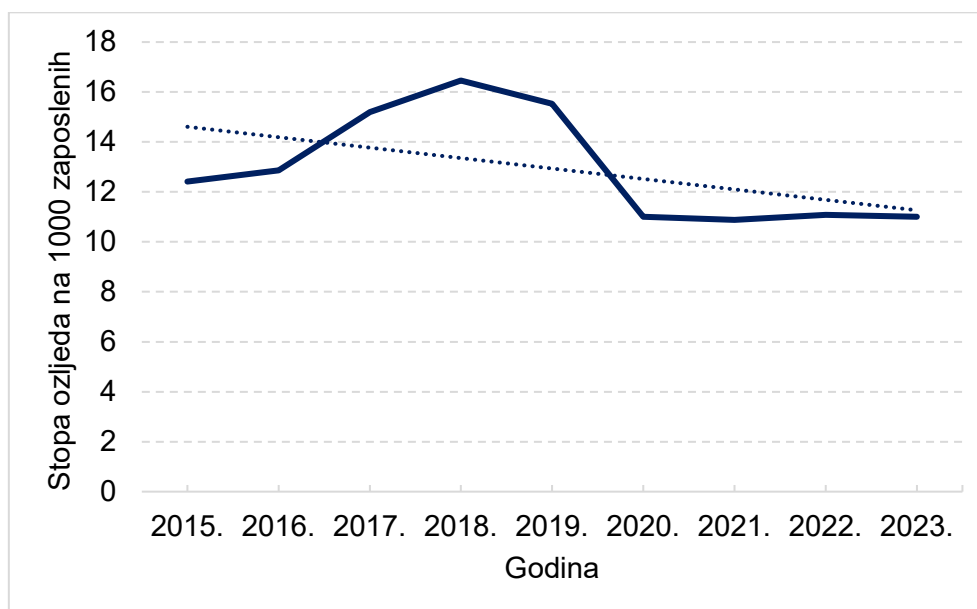
Kako je vidljivo na slici 2. najveći prosječni broj ozljeda na radu je u djelatnosti C koja predstavlja prerađivačku industriju i iznosi 3756,11 ozljeda na radu godišnje. Međutim, važno je naglasiti kako je ovo prosječan godišnji broj ozljeda na radu za razdoblje od devet

godina koji je izračunan na temelju ukupnog broja prijavljenih ozljeda po svakoj od djelatnosti prema NKD – 2007. za razdoblje od 2015. do 2023. godine.

**Tablica 3.** Stopa ukupnih ozljeda na radu na 1000 zaposlenih za područje F Građevinarstvo za razdoblje od 2015. do 2023. godine (izrada autora prema [21–29])

Stopa ozljeda na 1000 zaposlenih za područje F	Godina								
	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2021.	2022.	2023.
	12,41	12,86	15,20	16,46	15,53	11,01	10,88	11,08	11,00

Na slici 3. prikazano je kretanje stope ukupnih ozljeda na radu na 1000 zaposlenih za područje F Građevinarstvo za razdoblje od 2015. do 2023. godine.



**Slika 3.** Kretanje stope ukupnih ozljeda na radu na 1000 zaposlenih za područje F Građevinarstvo za razdoblje od 2015. do 2023. godine (izrada autora prema [21–29])

Slika 3. prikazuje trend pada stope ukupnih ozljeda na radu na 1000 zaposlenih za područje F Građevinarstvo za promatrano razdoblje od 2015. do 2023. godine.

## 5. Zaključak

Provođenje zaštite na radu je vrlo složeno. Za uspješno provođenje iste potrebno je puno znanja, suradnja svih zaposlenih, i naravno određena novčana sredstva. Međutim, uložena novčana sredstva u zaštitu na radu se isplate te su odlično ulaganje jer ljudski život nema cijenu. Zadovoljan, zdrav i sretan zaposlenik je dobar i produktivan radnik. Poslodavci imaju pravnu i etičku dužnost osigurati zaštitu i očuvanje zdravlja zaposlenika u radnom okruženju. Na razloge nesigurnog ponašanja utječu unutarnji čimbenici (osobne karakteristike zaposlenika) te vanjski čimbenici.



U radu su prikazani pravni propisi (zakoni, pravilnici, uredbe, naputci i tehnički propisi) koje je potrebno poznavati kod provođenja zaštite na radu kao i dane definicije zaštite na radu. Kratko je opisan postupak prijave ozljede na radu, odnosno utvrđivanje i priznavanje iste. Za razdoblje od 2015. do 2023. godine prikazano je kretanje stope ukupnih ozljeda na radu na 1000 zaposlenih za područje F Građevinarstvo te je na slici 3. vidljiv trend pada ozljeda na radu za područje F. Provođenje mjera zaštite na radu nikad ne treba biti ostavljeno slučaju i raditi ga samo u tolikoj mjeri da se zadovolje zakonski propisi nego je provođenje potrebno raditi pažljivo, angažirati se u najvećoj mogućoj mjeri jer ljudski život nema cijenu, a kada se ozljeda dogodi onda je već kasno.

## 6. Literatura

- [1] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o zaštiti na radu. Republika Hrvatska, 2018.
- [2] Mihić, Matej. Kako povećati razinu sigurnosti na gradilištima? // *Građevinar*, 76 (2024), 5; 471-475. (ISSN 1333-9095)
- [3] Hassan, C. R. Che; Basha, O. J.; Hanafi, W. H. Wan. Perception of Building Construction Workers Towards Safety, Health and Environment // *Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (2007), 3; 271-279. (ISSN 1823-4690)
- [4] Wang, Jiayuan; Zou, Patrick X. W.; Li, Penny P. Critical factors and paths influencing construction workers' safety risk tolerances // *Accident Analysis & Prevention*, 93 (2016), 267-279. (ISSN 1879-2057)
- [5] Hallowell, Matthew. Safety risk perception in construction companies in the Pacific Northwest of the USA // *Construction Management and Economics*, 28 (2010), 4; 403-413. (ISSN 1466-433X)
- [6] Wang, Jiayuan; Yuan, Hongping. Factors affecting contractors' risk attitudes in construction projects: Case study from China // *International Journal of Project Management*, 29 (2011), 2; 209-219. (ISSN 1873-4634)
- [7] Dixit, Vinayak; Harrison, Glenn W.; Rutström, E. Elisabet. Estimating the subjective risks of driving simulator accidents // *Accident Analysis & Prevention*, 62 (2014), 63-78. (ISSN 1879-2057)
- [8] de Camprieux, Renaud; Desbiens, Jacques; Feixue, Yang. 'Cultural' differences in project risk perception: An empirical comparison of China and Canada // *International Journal of Project Management*, 25 (2007), 7; 683-693. (ISSN 1873-4634)
- [9] Liu, Junying; Meng, Fanye; Fellows, Richard. An exploratory study of understanding project risk management from the perspective of national culture // *International Journal of Project Management*, 33 (2015), 3; 564-575. (ISSN 1873-4634)
- [10] Acar, Emrah; Göç, Yasemin. Prediction of risk perception by owners' psychological traits in small building contractors // *Construction Management and Economics*, 29 (2011), 8; 841-852. (ISSN 1466-433X)
- [11] Choudhry, Rafiq Muhammad. Achieving Safety and Productivity in Construction Projects // *Journal of Civil Engineering and Management*, 23 (2015), 2; 311-318. (ISSN 1392-3730)
- [12] Hinze, J. Incurring the cost of injuries versus investing in safety. In: Coble, R. J.; Hinze, J. W.; Haupt, T. C. (ur.). *Construction safety and health management*, New Jersey: Prentice Hall; 2000. (ISBN 0130871737)
- [13] Ministarstvo rada, mirovinskoga sustava obitelji i socijalne politike. Prijava stručnih ispita iz ZNR, 2024. [Online]. Dostupno na: <https://uznr.mrms.hr/znr/strucnjaci-zastite->



na-radu/ (Pristupljeno 03.07.2024.)

- [14] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Pravilnik o osposobljavanju iz zaštite na radu i polaganju stručnog ispita. Republika Hrvatska, 2021.
- [15] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o obveznom zdravstvenom osiguranju. Republika Hrvatska, 2023.
- [16] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Zakon o mirovinskom osiguranju. Republika Hrvatska, 2022.
- [17] Hrvatski zavod za zdravstveno osiguranje. 1. ozljeda na radu, 2024. [Online]. Dostupno na: <https://hzzo.hr/ozljede-na-radu-i-profesionalne-bolesti-specificna-zdravstvena-zastita/1-ozljeda-na-radu> (Pristupljeno 15.07.2024.)
- [18] Mediatley. MKB-10 2024. [Online]. Dostupno na: <https://mediatley.co/hr/icd> (Pristupljeno 15.07.2024.)
- [19] Hrvatski zavod za javno zdravstvo. Međunarodna klasifikacija bolesti i srodnih zdravstvenih problema. Drugo izdanje. Zagreb: Medicinska naklada, 2008. (ISBN 978-953-176-555-8)
- [20] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Odluka o nacionalnoj klasifikaciji djelatnosti 2007. - NKD 2007. Republika Hrvatska, 2007.
- [21] Hrvatski zavod za zaštitu zdravlja i sigurnost na radu. Analiza ozljeda na radu za 2015. godinu. Zagreb, 2016.
- [22] Hrvatski zavod za javno zdravstvo - služba za medicinu rada. Analiza ozljeda na radu za 2016. godinu. Zagreb, 2016.
- [23] Hrvatski zavod za javno zdravstvo - služba za medicinu rada. Analiza ozljeda na radu za 2017. godinu. Zagreb, 2017.
- [24] Hrvatski zavod za javno zdravstvo - služba za medicinu rada. Analiza ozljeda na radu za 2018. godinu. Zagreb, 2019.
- [25] Hrvatski zavod za javno zdravstvo - služba za medicinu rada. Analiza ozljeda na radu za 2019. godinu. Zagreb, 2020.
- [26] Hrvatski zavod za javno zdravstvo - služba za medicinu rada. Analiza ozljeda na radu za 2020. godinu. Zagreb, 2022.
- [27] Hrvatski zavod za javno zdravstvo - služba za medicinu rada. Analiza ozljeda na radu za 2021. godinu. Zagreb, 2022.
- [28] Hrvatski zavod za javno zdravstvo - služba za medicinu rada. Analiza ozljeda na radu za 2022. godinu. Zagreb, 2023.
- [29] Hrvatski zavod za javno zdravstvo - služba za medicinu rada. Analiza ozljeda na radu za 2023. godinu. Zagreb, 2024.

# **Karakteristične situacije kod prijevoza plinova u posudama pod tlakom cestovnim prometom**

## ***Characteristic Situations with the Carriage of Gasses in Pressure Receptacles by Road***

**M. Krstajić<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>“Messer Tehnogas AD Beograd“, dio stranog društva „Fabrika Petrovac“, Petrovac, Crna Gora

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [marko.krstajic@gmail.com](mailto:marko.krstajic@gmail.com)

### **Sažetak**

U praksi prijevoza cestovnim prometom pakovanja opasnih tvari klase 2, odnosno plinova u posudama pod tlakom, mogu se ponavljati situacije s karakterističnim dvojabama. Situacije se odnose na izuzeća u svezi s namjenom prijevoza i količinama koje se prevoze na prijevoznoj jedinici, prijevoz autocestom prazne neočišćene ambalaže, označavanje vozila, postupanje sa „DOT“ posudama i stručno osposobljavanje drugih osoba, osim vozača koji posjeduju svjedodžbu. Europski sporazum o međunarodnom cestovnom prijevozu opasnih tvari - ADR najčešće daje odgovor na dvojbe, ali ostaje otvoreno pitanje koliko je lako zainteresiranim stranama i nadležnim tijelima prepoznati odgovor. Iako je materija uređena međunarodnim sporazumom, u slučaju određenih izuzeća sigurnosna pitanja ostaju djelomice otvorena na nivou zakonskih rješenja koja bliže uređuju ovu oblast u regiji.

**Ključne riječi:** ADR, prijevoz opasnih tvari, klasa 2 opasnih tvari, plinovi, posude pod tlakom

### **Abstract**

In the practice of carriage of dangerous good by road of packages of Class 2 dangerous goods, i.e. gases in mobile pressure receptacles, situations with characteristic uncertainties can be repeated. The situations refer to the cases of exemptions related to the nature of transport operation and quantities carried per transport unit, highway carriage of empty uncleaned packaging, marking of vehicles, handling of "DOT" cylinders and training of persons other than drivers holding a certificate. The European Agreement on the International Carriage of Dangerous Goods by Road - ADR in most cases provides an answer to these doubts, but the question remains open as to how easy it is for parties involved and competent authorities to recognize the answer. Although the matter is regulated by an international agreement, in the case of certain exceptions, security issues remain partly open at the level of legal solutions that more closely regulate this matter in the region.

**Key words:** ADR, carriage of dangerous goods, class 2 of dangerous goods, gases, pressure receptacles

## Uvod

Sporazum o međunarodnom prijevozu opasnih tvari u cestovnom prometu (ADR) [1] stupio je na snagu još 1968. godine pod pokroviteljstvom Ekonomske komisije Ujedinjenih naroda za Evropu (UNECE).

Sam sporazum je kratak i jednostavan ali uključuje obimne Dodatke A i B sukladno kojima se opasne tvari se mogu prevoziti vozilima u međunarodnom cestovnom prometu. Dodaci A i B se redovito ažuriraju, a izmjene su rezultat više od 50 godina najbolje prakse.

Regionalni pristup problematici je bitan jer iako ADR sa svojim obimnim dodacima detaljno uređuje ovu oblast, njegova primjena se uređuje na državnom nivou odgovarajućim zakonima što može uzrokovati pojedine nesukladnosti u unutarnjem ali i regionalnom cestovnom prometu. U tom smislu će se u ovom radu pojedine odredbe ADR-a staviti u kontekst važećih propisa u Crnoj Gori, Republici Hrvatskoj i Republici Srbiji.

Ključna svrha ADR-a je osigurati sigurnost tijekom prijevoza opasnih tvari i minimizirati rizik i posljedice nesreća tijekom prijevoza. U praksi prijevoza pakovanja opasnih tvari klase 2, odnosno plinova u prijenosnim posudama pod tlakom, mogu se ponavljati situacije s karakterističnim dvojama o kojima će biti riječi.

### 1. Transport posuda pod tlakom osobnim putničkim vozilima

Prijevoz posuda pod tlakom osobnim vozilima već na prvi pogled izaziva sumnju u regularnost, iako osobno vozilo udovoljava široko postavljenim definicijama vozila propisanim predmetnim zakonima u tri države regije.

**Tablica 1.** Definicije vozila u zakonima država regije

Crna Gora	Republika Hrvatska	Republika Srbija
Zakon o prevozu opasnih materija [2]	Zakon o prijevozu opasnih tvari [3]	Zakon o transportu opasne robe [4]
„vozilo je <b>svako motorno vozilo</b> namijenjeno za vožnju drumom, opremljeno <b>sa najmanje četiri točka, čija najveća konstrukcijska brzina prelazi 25 km/h</b> , kojem je dodato priključno vozilo, osim vozila koja se kreću šinama, traktora za poljoprivredu i šumarstvo, kao i svih pokretnih mašina čija brzina ne prelazi 40 km/h;“	„»vozilo« je <b>svako</b> prijevozno sredstvo u smislu članka 3. ovoga Zakona ( <b>motorno vozilo</b> ili priključno vozilo, željezničko vozilo, brod/plovilo ili drugo prijevozno sredstvo)“	„vozilo je <b>motorno vozilo</b> koje je namenjeno za upotrebu na putu, koje ima <b>najmanje četiri točka i čija maksimalna konstruktivna brzina prelazi 25 km/h</b> , kao i svako priključno vozilo, sa izuzetkom vozila koja se kreću po šinama, pokretnih mašina, kao i poljoprivrednih i šumskih traktora koji se prilikom transporta opasne robe ne kreću brzinom većom od 40 km/h;“

Osobnim putničkim vozilom najčešće se služe neupućeni pojedinci kada žele prevesti bocu od radionice do gradilišta, bocu medicinskog kisika za zdravstvene potrebe osobe, bocu

ugljičnog dioksida za potrebe kafića, itd. U ovim slučajevima, prema ADR-u, primjenjuju se izuzeća u svezi sa namjenom prijevoza prema kojima se odredbe utvrđene u ADR-u ne odnose npr. na :

- „prijevoz opasnih tvari koji obavljaju pojedinci kad je navedena tvar pakirana za maloprodaju i namijenjena osobnoj ili domaćoj uporabi, ili za razonodu i športske aktivnosti, pod uvjetom da su poduzete mjere da se spriječi moguće curenje sadržaja u uobičajenim uvjetima prijevoza.“<sup>1</sup>
- „hitan prijevoz namijenjen spašavanju ljudskih života ili zaštiti okoliša, pod uvjetom da su poduzete sve sigurnosne mjere i da je prijevoz potpuno siguran;“<sup>2</sup>

Na slikama 1, 2 i 3 prikazani su primjeri utovara plinskih posuda u osobno putničko vozilo kakvi se mogu susresti u praksi.



**Slika 1.** Boce kisika i acetilena utovarene u osobno vozilo



**Slika 2.** Posuda za tekući dušik utovarena u osobno vozilo



**Slika 3.** Boca kisika utovarena u osobno vozilo

<sup>1</sup> Vidi 1.1.3.1 (a) [1]

<sup>2</sup> Vidi 1.1.3.1 (e) [1]



Zanimljivo je da se ograničenja u pogledu količina koje se mogu prevesti po prijeznoj jedinici niti ne odnose na dva navedena izuzeća<sup>3</sup>, iz čega proizlazi da ako vozilo pojedinca ili Doma zdravlja dolazi za preuzimanje boca s plinovima, nema ograničenja u količini koju mogu uzeti uz uvjet da su poduzete sve sigurnosne i mjere protiv curenja. Međutim, kao što ćemo vidjeti kasnije, upravo su sigurnosne mjere te koje ograničavaju količinu, iako ne jednoznačno.

## 2. Transport posuda pod tlakom teretnim vozilom u slučaju izuzeća

Ova situacija se može promatrati na dva načina.

Ako se prijevoznik poziva na izuzeće u svezi sa namjenom prijevoza onda se odredbe utvrđene u ADR-u ne odnose na „prijevoz koji obavljaju poduzeća kao pomoćnu djelatnost, (...) u količinama koje nisu iznad 450 litara u jednom pakovanju (...), i ne prelaze najveće dozvoljene količine navedene u 1.1.3.6. kao i uz uvjet da su poduzete mjere protiv curenja sadržaja u uobičajenim uvjetima prijevoza. (...) Prijevozi koje obavljaju poduzeća za vlastitu opskrbu ili vanjsku ili unutarnju distribuciju, nisu u okviru ovog izuzeća;“<sup>4</sup>

Sa druge strane ilustracija najvećih ukupnih količina po prijeznoj jedinici<sup>5</sup> u pojedinim slučajevima za klasu bila bi:

- kisik ili dušik 25 boca od po 40 litara ili
- 51 acetilenska boca od po 6,5 kg ili
- Kombinirano npr. 16 boca kisika od 40 litara i 16 acetilenskih boca od 6,5 kg ili
- Tekući dušik do 1000 kg.

Promatrajući kombinirano ova dva aspekta, ako bi se netko trebao pozvati na izuzeće vezano prijevoz opasnih tvari kao pomoćnu djelatnost, jedina bi razlika bila u tome što bi tekući dušik morao biti u pakovanjima od najviše 450 litara.

U praksi bi površno pozivanje tvrtke na izuzeće moglo izgledati kao na Slici 4. Naravno, i u ovom slučaju vrlo je upitno jesu li poduzete zahtijevane mjere protiv curenja.



**Slika 4.** Količine koje ne prelaze maksimum prema izuzeću

<sup>3</sup> Vidi 1.1.3.6.5 [1]

<sup>4</sup> Vidi 1.1.3.1 (c) [1]

<sup>5</sup> Vidi 1.1.3.6 [1]

**3. Mjere protiv curenje sadržaja u uobičajenim uvjetima prijevoza u slučaju izuzeća**  
Iako u prethodnim slučajevima ili nisu definirane ili nisu prekoračene dopuštene količine, vrlo je diskutabilno jesu li poduzete mjere protiv curenje sadržaja u uobičajenim uvjetima prijevoza, čak i ako su boce utovarene u vozilo vezane.

Promatramo li okolnosti izvan uobičajenih uvjeta prijevoza, pozivajući se ne na odredbe ADR-a već na pravila struke, glavni rizici u slučaju prometne nezgode bili bi:

- nekontrolirano kretanje boce ako nije dobro pričvršćena;
- lom ventila koji može uzrokovati:
  - kretanje boce poput projektila
  - curenje sadržaja koje, ovisno o vrsti plina, može dovesti do maglovite, zagušljive ili zapaljive atmosfere.

U slučaju kriogenih otvorenih posuda moguće je stvoriti zagušljivu atmosferu i bez prometne nesreće, u slučaju dužih zastoja u prometu i sl.

Pitanje je koliko korisnika koji se smatraju izuzetima od primjene odredaba ADR-a zna da se i kod izuzeća u svezi s količinama primjenjuje većina odredbi ovog međunarodnog ugovora i pretpostavljam da većina njih smatra sebe potpuno izuzetima. Ako količina plinova u prenosivim posudama koja se prevozi na prijevoznoj jedinici ne prelazi vrijednosti definirane u 1.1.3.6.3 i 1.1.3.6.4 [1], posude se mogu prevoziti u jednoj prijevoznoj jedinici pri čemu nije potrebno udovoljiti sljedećim odredbama u dijelu primjenjivom na klasu 2:<sup>6</sup>

- Sigurnosne odredbe prema 1.10 [1];
- Pisana uputstva iz 5.4.3 [1];
- Odredbe o prijevozu u pakovanjima u skladu sa 7.2 [1];
- Označavanje velikim listicama opasnosti i obilježavanje vozila prema 5.3 [1]. Ali obaveza stavljanja velikih listica opasnosti na vozila kojima se prevoze samo pakovanja važi samo za klasu 1 i klasu 7 i svakako nije primjenjiva na klasu 2;<sup>7</sup>
- Uvjeti o izradbi i odobravanju vozila u skladu sa dijelom 9 [1]. Ali za vozila koja prevoze pakovanja klase 2 „nije potrebna nikakva posebna potvrda, osim onih koje se zahtijevaju prema općim sigurnosnim propisima koji se redovito primjenjuju na vozila u državi podrijetla i registracije.“<sup>8</sup>

Ne primjenjuju se ni odredbe dijela 8, Uvjeti za članove posade vozila, opremu, rad i dokumentaciju, sa izuzetkom:

- Prijevozna dokumentacija iz 8.1.2.1(a) [1]
- Protupožarni aparati u skladu sa odredbama od 8.1.4.2 do 8.1.4.5 [1]
- Stručno osposobljavanje drugih osoba osim vozača koji posjeduju ADR karticu prema 8.2.3 [1]
- Zabrana otvaranja ambalaže, odredba 8.3.3 [1]
- Prenosive svjetiljke, kao što je objašnjeno u 8.3.4 [1]
- Zabrana pušenja prema 8.3.5 [1]

<sup>6</sup> Vidi 1.1.3.6.2 [1]

<sup>7</sup> Vidi 5.3.1.5 [1]

<sup>8</sup> Vidi 9.1.2 [1]

Vezano uz navedeno, zanimljivo je da iz toga proizlazi da vozilo mora imati protupožarni, ali se ne primjenjuje odredba da ga članovi posade moraju znati koristiti.<sup>9</sup>

Međutim, to nije sve. Navedeno je koje se odredbe ne primjenjuju uz nekoliko iznimaka, iz čega slijedi da se primjenjuju sve ostale odredbe koje nisu izričito navedene.

Nekome tko je profesionalno vezan za plinsku industriju, kroz pravila struke bi bilo jasno da boce koje u datom trenutku nisu u uporabi moraju biti učvršćene u određenom položaju sa ventilom zaštićenim kapičom i na dobro prozračenom mjestu ili u posebnom prostoru. Sve to stvarno piše negdje u ADR-u ako se malo bolje pogleda. Kako bismo povezali zajedničkom niti karakteristične predstavnike klase 2, u Tablici 2 izvučene su ključne odredbe za neke od njih:

**Tablica 2.** Izvod iz Dijela 3, Tablice A, popisa opasnih tvari [1]

UN broj	Ime i opis	Ambalaža (pakovanja)	Posebne odredbe za prijevoz
		Upute za pakiranje	Utovar, istovar i manipulacija
	3.1.2	4.1.4	7.5.11
(1)	(2)	(8)	(18)
1066	DUŠIK, STLAČEN	P200	CV9 CV10 CV36
1072	KISIK, STLAČEN	P200	CV9 CV10 CV36
1013	UGLJIČNI DIOKSID	P200	CV9 CV10 CV36
1001	ACETILEN, OTOPLJENI	P200	CV9 CV10 CV36
1965	UGLJIKOVODIKOV PLIN, SMJESA, UKAPLJENA, N.D.N. smjesa A, A01, A02, A0, A1, B1, B2, B ili C	P200	CV9 CV10 CV36
1977	DUŠIK, DUBOKO OHLAĐEN, TEKUĆI	P203	CV9 CV11 CV36
1073	KISIK, DUBOKO OHLAĐEN, TEKUĆ	P203	CV9 CV11 CV36

Kada se sažmu elementi uputa za pakiranje, posebne odredbe za prijevoz i ostale primjenjive odredbe, dobivaju se sljedeće "mjere protiv curenje sadržaja u uobičajenim uvjetima prijevoza " i mogu se grupirati na sljedeći način:

#### Sprječavanje pomjerenja boce u vozilu

- „(...) Pakovanja koja sadrže opasne tvari (...) moraju biti osigurani prikladnim sredstvima koja su sposobna zadržati teret na svom mjestu (kao što su trake za učvršćenje, poprečne letve, konzole i sl.) u vozilu ili kontejneru kako bi se spriječilo pomicanje u svim smjerovima zbog čega može doći do prevrtanja i oštećenja tereta. (...) Pomicanje pakovanja može biti spriječeno popunjavanjem praznog prostora zaštitnim materijalom ili da se pakovanja pričvrste ili svežu. Ako se koristi zaštita kao što su trake i spona ne smije ih se prenapregnuti da se ne oštete ili preoblikuju

<sup>9</sup> Vidi 8.3.2 [1]





pakovanja. Smatrat će se da je udovoljeno zahtjevima ovog odlomka kada je teret osiguran u skladu s normom EN 12195-1:2010.<sup>10</sup>

- „Pakovanja se ne smiju bacati ni podvrgavati udarcima. Pakovanja moraju biti osigurana na vozilu ili kontejneru tako da se ne mogu prevrnuti ili pasti s vozila.“<sup>11</sup>
- Cilindre, odnosno je tlačne posuda obujma vode manje od 150 litara „treba stavljati paralelno ili pod pravim kutom na uzdužnu os vozila ili kontejnera; međutim, oni koji su u blizini prednjega poprečnog zida, moraju se postaviti na navedenu os pod pravim kutom. Kratki cilindri velikoga promjera (oko 30 cm i više), mogu se skladištiti uzdužno s uređajima za zaštitu ventila usmjerenima prema sredini vozila ili kontejnera.
- Cilindri koji imaju dostatnu stabilnost ili se prevoze u prikladnim uređajima koji učinkovito sprječavaju da se prevrnu, mogu se postaviti u uspravni položaj.
- Cilindri koji se polažu ravno, moraju biti čvrsto i primjereno učvršćeni klinovima, pričvršćeni ili učvršćeni tako da se ne mogu pomicati.“<sup>12</sup>
- Za otvorene kriogene posude važi da „Posude moraju uvijek biti u položaju za koji su konstruirane i zaštićene od mogućnosti da se oštete drugim pakovanjima.“<sup>13</sup>

#### Provjetrenost ili posebni odjeljak vozila:

- „Poželjno je da se pakovanja tovare u otvorena ili prozračena vozila (...). Ako to nije izvedivo i pakovanja se prevoze u drugim zatvorenim vozilima (...), razmjena plina između teretnog prostora i vozačeve kabine mora se spriječiti i vrata teretnoga prostora vozila ili kontejnera moraju biti označena sljedećim slovima, koja ne smiju biti manja od 25 milimetara:

"UPOZORENJE  
NEMA PROZRAČIVANJA  
OPREZNO OTVARATI"

Navod mora biti napisan na jeziku koji pošiljalatelj smatra primjerenim.(...)<sup>14</sup>:

#### Zaštita ventila:

- „Ventili i ostale sastavnice koje ostaju priključene na ventil za vrijeme prijevoza (npr. naprave za rukovanje i adapteri), moraju biti konstruirani i izrađeni tako da prema svojim svojstvima mogu podnijeti oštećenje bez ispuštanja sadržaja ili moraju biti zaštićeni od oštećenja koje bi moglo prouzročiti slučajno ispuštanje sadržaja posude pod tlakom“<sup>15</sup> čepovima, kapticama, pokrovima, automatskim zaštitnim nastavcima, okvirima kod cilindara u snopovima ili zaštitnim kutijama.

Primjena suštine navedenih odredbi u slučajevima izuzeća u svezi sa namjenom prijevoza koji obavljaju pojedinci, odnosno u hitnom prijevozu, može se promatrati i kao poštivanje

<sup>10</sup> Vidi 7.5.7.1 [1]

<sup>11</sup> Vidi 7.5.11, CV9 [1]

<sup>12</sup> Vidi 7.5.11, CV10 [1]

<sup>13</sup> Vidi 7.5.11, CV11 [1]

<sup>14</sup> Vidi 7.5.11, CV36 [1]

<sup>15</sup> Vidi [4.1.6.8] [1]



opće odredbe o postojanju mjera koje sprječavaju curenje u uobičajenim uvjetima prijevoza, odnosno poduzimanjem svih sigurnosnih mjera, na način da boce moraju biti osigurane od pomicanja, ventil zaštićen čepom, kapičom ili zaštitnim nastavcima, vozilo dobro prozračeno, a u slučaju prijevoza tekućeg dušika, spremnik mora biti u posebnom odjeljku vozila.

#### 4. Osposobljavanje drugih osoba koje su uključene u cestovni prijevoz opasnih tvari osim vozača koji posjeduju svjedodžbu odnosno ADR karticu i sigurnosnog savjetnika

Moglo bi se reći da se i podrazumijeva da „osobe čije se dužnosti odnose na prijevoz opasnih tvari u cestovnome prometu moraju proći obuku o uvjetima kojima se regulira prijevoz opasnih tvari koja odgovara njihovim odgovornostima i dužnostima u poglavlju 1.3. Uvjet se odnosi na pojedince, kao što je osoblje zaposleno kod operatora u cestovnome prometu ili pošiljatelja, osoblje koje utovaruje ili istovaruje opasne tvari, **osoblje zaposleno u otpremničkim ili špediterskim agencijama i vozači vozila, osim vozača** koji imaju uvjerenje sukladno 8.2.1, a koji sudjeluju u prijevozu opasnih tvari u cestovnome prometu.“<sup>16</sup> Jedna od odredbi koja se primjenjuje čak i u slučaju izuzeća u odnosu na najveće dopuštene količine po prijevoznj jedinici jest da „zaposlenici u poduzećima, koji prema poglavlju 1.4 imaju obveze koje se odnose na prijevoz opasnih tvari, moraju se osposobiti za prijevoz opasnih tvari u skladu s odgovarajućim odgovornostima i obvezama. Zaposlenici se moraju osposobiti, u skladu s odjeljkom 1.3.2, prije preuzimanja odgovornosti i vrše samo funkcije za koje još nije omogućena obuka, pod izravnim nadzorom osposobljene osobe. Zahtjevima za osposobljavanjem, koji se odnose na sigurnost opasnih tvari u poglavlju 1.10, mora se udovoljiti.“<sup>17</sup>

Stvari postaju manje jasne kada dođemo do pitanja ko ima ovlasti da sprovodi ADR-om propisanu obuku osoblja zaposleno u otpremničkim ili špediterskim agencijama kao i vozače osobnih kao i vozila čiji teret podliježe izuzećima? Pogledajmo u Tablici 3 odredbe zakona koji bliže uređuju ovo pitanje u državama regije.

**Tablica 3.** Osposobljavanje drugih osoba prema zakonima država regije

Crna Gora	Republika Hrvatska	Republika Srbija
Zakon o prevozu opasnih materija [2]	Zakon o prijevozu opasnih tvari [3]	Zakon o transportu opasne robe [4]
<b>Član 32</b> „Lica koja učestvuju u <b>utovaru i istovaru</b> opasnih materija u drumskom i željezničkom saobraćaju moraju imati najmanje III nivo kvalifikacije obrazovanja i uvjerenje o	<b>Članak 31.</b> „(1) Osobe koje sudjeluju u prijevozu opasnih tvari, odnosno pri <b>pakiranju, utovaru, istovaru, punjenju i pražnjenju</b> koje je vezano s tim prijevozom, moraju imati	<b>Član 28.</b> „ <b>Učesnici</b> u transportu u drumskom saobraćaju dužni su da obezbede da svi učesnici koji učestvuju u transportu opasne

<sup>16</sup> Vidi 8.2.3 [1]

<sup>17</sup> Vidi 1.3.1 [1]

<p>osposobljenosti za vršenje poslova utovara i istovara opasnih materija izdato u skladu sa ovim zakonom.“</p> <p><b>Član 33</b></p> <p>„Obrazovanje i osposobljavanje lica iz člana 32 ovog zakona <b>sprovodi organizator obrazovanja</b>, u skladu sa propisima kojima se uređuje oblast obrazovanja, po programu koji mora biti u skladu sa ADR sporazumom.“</p>	<p>odgovarajuće obrazovanje, završen program stručne poduke, ovisno o poslovima i obvezama radnog mjesta i položiti ispit stručne poduke.</p> <p>(...)</p> <p>(3) Stručnu poduku osoba iz stavka 1. ovoga članka <b>mogu obavljati ustanove koje ovlasti ministarstvo</b> nadležno za obrazovanje, ako ispunjavaju uvjete iz posebnih propisa.“</p>	<p>robe završe obuku u skladu sa odeljkom <b>8.2.3 ADR.</b>“</p>
---	---	--

U ovom kontekstu pogledajmo i obaveze sigurnosnog savjetnika.

**Tablica 4.** Obveze sigurnosnog savjetnika

ADR	Crna Gora	Republika Hrvatska	Republika Srbija
<p>Odredba 1.8.2</p>	<p>Član 28 Zakona o prevozu opasnih materija</p>	<p>Članak 29 Zakona o prijevozu opasnih tvari</p>	<p>Zakon o transportu opasne robe</p>
<p>„- <b>savjetovanje</b> svog poduzeća o prijevozu opasnih tvari; - <b>praćenje običaja i</b> postupaka u svezi (...) <b>pravilnog osposobljavanja</b> zaposlenika, (...);“</p>	<p>„7) <b>savjetuje zaposlene</b> koji vrše poslove u vezi prevoza opasnih materija; 8) <b>prati osposobljavanje</b> zaposlenih u vezi prevoza opasnih materija (...);“</p>	<p>„- <b>savjetovanje</b> uprave pravne osobe ili fizičke osobe, - <b>savjetovanje</b> drugih zaposlenih u pravnoj i kod fizičke osobe, - <b>nadgledanje i praćenje stručne izobrazbe</b> zaposlenih u pravnoj ili kod fizičke osobe (...);“</p>	<p>„Savetnik za bezbednost je dužan da <b>izvršava obaveze</b> iz odeljka 1.8.3 ADR/RID/ADN.“</p>

I pored detaljnog pregleda ostaje otvoreno pitanje tko osposobljava specifične slučajeve „drugih osoba“ čije se dužnosti odnose na prijevoz plinskih boca i kakvu obuku treba provoditi? Kao što vidimo u Tablici 4 crnogorski zakon propisuje da osobe koje učestvuju u utovaru i istovaru opasnih materija moraju imati uvjerenje o osposobljenosti za obavljanje poslova utovara i istovara opasnih materija, dok hrvatski zakon dodatno sličnom odredbom uređuje i status osoba koje sudjeluju pri pakiranju, punjenju i pražnjenju. Međutim, šta sa obukom preostalih „drugih osoba“ o kojima zakoni šute a ustanove nemaju ovlasti da ih osposobljavaju dok su savjetnici ovlašteni samo da ih savjetuju.

U srpskom zakonu postoji korisna nepreciznost jer isti samo ukazuje na odjeljak 8.2.3 ADR. U realnosti je odredba primijenjena na način da savjetnik izvršava poduke „drugih osoba“

što se pokazalo kao dobra praksa dok u Crnoj Gori i Hrvatskoj ostaje bez odgovora pitanje ovlaštenja za poduku vozača koji prevoze robu što podliježe izuzeću.

## 5. Punjenje tzv. „DOT“ boca<sup>18</sup>

Tzv. „DOT“ boce predstavljaju punjive posude pod tlakom koje je odobrilo ministarstvo za promet Sjedinjenih Američkih Država, te koji su konstruirani i testirani sukladno standardima navedenim u 178. dijelu, Specifikacijama za pakiranje Naslova 49, Prijevoz, Kodeksa saveznih propisa.

U pojedinim slučajevima se događa da se donesu na punjenje DOT boce koje najčešće dolaze sa brodova, iz aviona, te iz doniranih ambulantskih vozila. Tipičan primjer takve boce je namijenjene za medicinski kisik je prikazan na Slici 5 [5].

Ako se DOT boce uvoze u područje pod jurisdikcijom TPED / ADR, prihvaćene za prijevoz u transportnim lancima, što uključuje pomorski i zračni prijevoz<sup>19</sup>, mogu se prevoziti s lokacije privremenog skladištenja na završnoj točki prijevoznog lanca do krajnjeg korisnika.

Osim toga, prijevoznom dokumentu mora se dodati dodatni komentar: „PRIJEVOZ U SKLADU S 1.1.4.7.1“<sup>20</sup>

DOT tlačne posude mogu se puniti i transportirati samo u svrhu izvoza u zemlje koje nisu stranke ADR-a ako su ispunjeni sljedeći zahtjevi:

- Da je punjenje sukladno odgovarajućim zahtjevima Kodeksa saveznih propisa Sjedinjenih Američkih Država;
- Označavanje i etiketiranje prema poglavlju 5.2 ADR, npr. naljepnica s UN brojem, UN odgovarajućim otpremnim nazivom, čitljiva tara i datum periodičnog pregleda itd.
- Ne smiju se podvrgavati popravku pukotina, propusnosti ili oštećenja.
- Ne smiju biti namijenjene prijevozu kada su propusne, oštećene, nepregledane i sa nečitljivom dokumentacijom i obilježjima.
- Posude pod tlakom ne smiju se puniti nakon što im dođe vrijeme za periodički pregled, ali se mogu prevoziti nakon isteka vremenskog roka za potrebe obavljanja inspeksijskog pregleda, uključujući i međuprijevozne operacije.



Slika 5. DOT boca

<sup>18</sup> Vidi 1.1.4.7 [1]

<sup>19</sup> Vidi 1.1.4.2 [1]

<sup>20</sup> Vidi 5.4.1.1.24 [1]

- Unesen dodatni komentar u prijevoznim dokumentima „PRIJEVOZ U SKLADU SA 1.1.4.7.2“.<sup>19</sup>

Jednostavnije i s praktičnog gledišta rečeno, može se reći da su DOT boce problematične za punjenje jer se radni i ispitni tlak izražavaju u „psi“ jedinicama umjesto u barima i obično se razlikuju od tipičnih tlakova punjenja, npr. 150, 200 ili 300 bara, pa ih nije moguće puniti u seriji zajedno s drugim bocama na način da se punjenje završi u istom trenutku. Osim toga, oznaka boje, odnosno boja boce je nesukladna, što naročito može biti problematično kod medicinskog kisika koji je registriran kao lijek i mora ispuniti stroge kriterije sukladnosti sa GMP smjernicama i Zakonom o lijekovima. Medicinski kisik je najčešći plin u DOT bocama koji se može susresti na području Crne Gore a vjerojatno i regije, te je u njegovom slučaju primjena ove mogućnosti ADR-a u praksi nemoguća.

## 6. Mogućnost kretanja autocestom vozila s praznim posudama pod tlakom

Vrijedi prodiskutirati i mogućnost postojanja izuzeća za kretanje vozila koja prevoze opasne tvari kada postoji znak zabrane kretanja takvim vozilima. Kao što se vidi na Slici 6, takav znak zabrane postoji na autocesti „Princeza Ksenija“ u Crnoj Gori, a primjer takvog vozila dat je na Slici 7 pod pretpostavkom da prevozi pune boce. Međutim, budući da se, vozila s plinskim bocama najčešće kreću u jednom smjeru sa punim, a u drugom sa praznim bocama, prijevoznik se u drugom slučaju može pozvati na izuzeće 1.1.3.5 [1] „ako su poduzete odgovarajuće mjere da se ukloni svaka moguća opasnost“, a te su mjere su u ovom radu već raspravljene.



**Slika 6.** Znak zabrane kretanja motornim vozilima koji prevoze opasne tvari



**Slika 7.** Vozilo koje prevozi pakovanja klase 2

Budući da tlačne posude u pravilu nikada nisu posve prazne kako bi se izbjegla kontaminacija unutrašnjosti boce, osim što se mogu tretirati kao neočišćene, postoji i izuzeće za zagušljive i oksidirajuće plinove, „ako tlak plina u posudama ili cisternama na temperaturi od 20 °C nije iznad 200 kPa (2 bar) i ako plin nije tekuć ili pothlađeni tekući plin.“<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Vidi 1.1.3.2 (c) [1].



Osim toga, vozila koja prevoze praznu i neočišćenu ambalažu nisu pobrojana među vozila koja moraju biti opremljena narančastim tablicama čak i kada su prazna i neočišćena.<sup>22</sup>

Na prvi pogled se čini da bi bilo dovoljno da prijevoznik sklopi narančaste ploče, prevozi samo praznu ambalažu za inertne i oksidirajuće plinove i podatke o opasnoj tvari u prijevoznom dokumentu zamjeni izrazom „PRAZNA POSUDA“ ili sl.<sup>23</sup> Uz to je već je bilo riječi o tome da li obaveza stavljanja velikih listica opasnosti na vozila kojima se prevoze samo pakovanja svakako nije primjenjiva na klasu 2.<sup>24</sup>

Stvar komplicira činjenica da član 22. crnogorskog Zakona o prevozu opasnih materija kaže da prijevozno sredstvo kojim se prevoze prazna i neočišćena ambalaža „mora da bude **označeno** na isti način kao i prevozno sredstvo kojim se prevozi ambalaža napunjena opasnom materijom“. Dodatno otežava situaciju što Crna Gora nema svoj zvanični prijevod ADR-a te se u zavisnosti od raspoloživosti u praksi koriste srpski ili hrvatski. U njima se termini iz izvorne verzije ADR-a na engleskom jeziku [6]: „marking“, „labeling“ i „placarding“, prevode izrazima: „obeležavanje“, „označavanje listicama opasnosti“ i „označavanje velikim listicama opasnosti“ respektivno. Mora se priznati da je u srpski prijevod [7] dosljedan u jednoznačnom korištenju navedenih izraza u svakoj odredbi ADR-a, dok kod u hrvatskom prijevodu u ovom smislu ima odstupanja u dosljednosti, što u tumačenju konteksta pojedinih zakonskih odredbi može imati uticaja. Slična je situacija i u regionalnim zakonima u ovom pogledu. Međutim, kada se pobliže analiziraju odredbe u kontekstu crnogorskog zakonodavstva, tumačenje bi moglo ići u smjeru se da se pojam „označavanje“ odnosi na listice opasnosti, a „obilježavanje“ na sve ostalo, uključujući i narančaste ploče.

Moguće je da bi ovakvo tumačenje u pogledu prijevoza prazne neočišćene ambalaže opasnih tvari klase 2 uz sklapanje narančastih ploča i kretanja autocestom i pored znaka zabrane, iako prilično dosljedno, naišlo na nerazumijevanje od strane nadzornih tijela ili upravitelja autoceste, pa je argumentirana komunikacija i usuglašavanje stajališta zainteresiranih strana i više nego poželjna.

## 7. Zaključak

U ovom radu su u okviru mogućeg i razumnog tumačenja preporučena rješenja za specifične situacije u prijevozu plinova u posudama pod tlakom i svode se na sljedeće:

- Poduzimanje mjera da se spriječi moguće curenje sadržaja u uobičajenim uvjetima prijevoza, svih sigurnosne mjere i da je prijevoz potpuno siguran kao i mjere da se ukloni svaka moguća opasnost.
- Usvajanje dobre prakse savjetovanja određenih kategorija „drugih osoba“ od strane sigurnosnog savjetnika u slučaju da osposobljavanje istih nije uređeno zakonom.
- Punjenje DOT boca u na propisan način i u propisanim slučajevima uzimajući u obzir i odredbe GMP smjernica i Zakona o lijekovima.

<sup>22</sup> Vidi 5.3.2.1.7 [1]

<sup>23</sup> Vidi 5.4.1.1.6.2.1 [1]

<sup>24</sup> Vidi 5.3.1.5 [1]



- Bliska komunikacija učesnika u prijevozu, nadzornih tijela i upravitelja autocesta u tumačenju odredbi ADR i zakona u državama regije, kako bi se prevenirale neprijatne situacije uslijed različitog tumačenja propisa.

Rješenje karakterističnih situacija rezultira iz uparivanja rješenja ADR-a i važećeg zakonodavstva Crne Gore, Hrvatske i Srbije, pa rezultat može dojmiti neobičnim, ali istovremeno može biti poticaj za dalju raspravu o ovim pitanjima i eventualno poboljšanje zakonskih rješenja.

## 8. Literatura

- [1] Sporazum o međunarodnom prijevozu opasnih tvari u cestovnom prometu ADR 2023 (poglavlja priloga A i B) hr. („Narodne novine“ // dodatak međunarodni ugovori br. 4/23 od 22. ožujka 2023.) (ISSN 1330-0032)  
<https://mmpi.gov.hr/promet/cestovni-promet-124/prijevoz-opasnih-tvari-u-cestovnom-prometu-adr/propisi-adr/sporazum-o-medjunarodnom-prijevozu-opasnih-tvari-u-cestovnom-prometu-adr/adr-2023-poglavlja-priloga-a-i-b-hr/23698>
- [2] Zakon o prevozu opasnih materija ("Sl. list CG", br. 33 od 4. avgusta 2014, 13/18)  
<https://www.gov.me/dokumenta/298c34bb-3dc2-489a-8bab-10ee8779c1be>
- [3] Zakon o prijevozu opasnih tvari („Narodne novine“ br. 79/07 od 30.07.2007)  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007\\_07\\_79\\_2480.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007_07_79_2480.html)
- [4] Zakon o transportu opasne robe ("Službeni glasnik RS", br. 104 od 23. decembra 2016, 83 od 29. oktobra 2018, 95 od 8. decembra 2018 - dr. zakon, 10 od 15. februara 2019 - dr. zakon)  
<https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2016/104/3/reg>
- [5] <https://www.amazon.com/ICS-Industries-Medical-Oxygen-Cylinder/dp/B085LKH31V>
- [6] ADR 2023 - Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. New York and Geneva : United Nations, UNECE, 2022., ECE/TRANS/326 (ISBN 978-92-1-139211-1, ISSN 2411-8605)  
<https://unece.org/transport/standards/transport/dangerous-goods/adr-2023-agreement-concerning-international-carriage>
- [7] Izmene i dopune tehničkih propisa koji su sastavni deo Sporazuma o međunarodnom drumskom prevozu opasne robe, Aneksi A i B "ADR 2023" (Službeni glasnik RS - Međunarodni ugovori br. 4/24 od 18.07.2024.)  
[https://www.mgsi.gov.rs/sites/default/files/adr\\_2023\\_tom\\_1.pdf](https://www.mgsi.gov.rs/sites/default/files/adr_2023_tom_1.pdf)  
[https://www.mgsi.gov.rs/sites/default/files/adr\\_2023\\_tom\\_2.pdf](https://www.mgsi.gov.rs/sites/default/files/adr_2023_tom_2.pdf)
- [8] Tubić, Jasmina. Preventivne mere pri proizvodnji, pakovanju, transportu, skladištenju, korišćenju i uništavanju štetnih i opasnih materija // Preventiva u oblasti zaštite i zdravlja na radu / Jelić Milutin (ur.) (ISBN 978-86-909119-6-7). Beograd : Tehpro, 2010.
- [9] MEST ISO 31000:2018 Menadžment rizikom – Smjernice. Podgorica : ISME, 2018.
- [10] MEST ISO 22320:2019 Bezbjednost i fleksibilnost – Menadžment vanrednim situacijama. Podgorica : ISME, 2019.

# Klimatske promjene i obrana od tuče u Hrvatskoj Climate Changes and Defense Against Hail in Croatia

M. Ivanović

Panon, institut za strateške studije, Osijek, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [panon.institut@gmail.com](mailto:panon.institut@gmail.com)

## Sažetak

Značajno povećanje učestalosti ekstremnih vremenskih prilika planetarni je fenomen, pa tako i na području Hrvatske, s velikim štetama u poljoprivredi, šumarstvu i naseljima. Nevrijeme praćeno tučom poseban je problem za područje Slavonije i Baranje. Poljoprivrednici i predstavnici lokalnih samouprava dovode u pitanje organizaciju službi obrane od tuče, a Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) uporno tvrdi da obrana od tuče nije učinkovit sustav te predlaže plaćanje osiguranja usjeva. U radu se preispituje argumentacija DHMZ-a i ukazuje na moguće načine rješavanja ovog problema.

**Ključne riječi:** Državni hidrometeorološki zavod, Klimatske promjene, Obrana od tuče, Slavonija i Baranja, Politika zaštite okoliša

## Abstract

In a significant increase in the frequency of extreme weather conditions is a planetary phenomenon, including in the territory of Croatia, with major damages in agriculture, forestry and settlements. Storms accompanied by hail are a special problem for the area of Slavonia and Baranja. Farmers and representatives of local self-governments question the organization of hail defense services, and the State Hydro-Meteorological Institute (DHMZ) persistently claims that hail defense is not an effective system and suggests paying for crop insurance. The paper examines the argumentation of the DHMZ and indicates possible ways to solve this problem.

**Key words:** Hydro-Meteorological Institute, Climate change, Protection against hail, Slavonia and Baranja, Environmental policy

## 1. Uvodne napomene

Značajan rast učestalosti ekstremnih vremenskih prilika planetarna je pojava pa je tako i na području Hrvatske - s velikim štetama u poljoprivredi, šumarstvu i naseljima. Nevrijeme praćeno tučom poseban je problem za područje Slavonije i Baranje zbog velikog udjela obradivih poljoprivrednih površina i šuma u ukupnom prostoru, odnosno zbog ovisnost gospodarstva o vremenskim prilikama.

Poljoprivrednici i predstavnici lokalnih samouprava s područja slavonske regije već dugo godina postavljaju pitanja o kvaliteti organizacije i učinkovitosti službe za obrane od tuče





(OT). Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) - u isto vrijeme - tvrdi da obrana od tuče nije učinkovit sustav te predlaže njegovo ukidanje.

## 2. STAV DHMZ O OBRANI OD TUČE U HRVATSKOJ

Više je izvora i dokumenata iz kojih se vidi stav DHMZ- a o sustavu obrane od tuče; izjave za medije se ne uzimaju u obzir. Ovdje se daje kraći pregled četiri dokumenta DHMZ i jedan Ministarstva poljoprivrede

### 2.1. Analiza sustava obrane od tuče

Izješće i mišljenje o opravdanosti daljnjeg rada sustava obrane od tuče u Republici Hrvatskoj“ iz srpnja 2018 [1].

Sažetak
1. Uvod
1.1 Što je tuča i kako nastaje
1.2 Tuča u Hrvatskoj
2. Obrana od tuče u RH
2.1 Raketna obrana od tuče
2.2 Obrana od tuče prizemnim generatorima
2.3 Učinkovitost obrane od tuče
2.4 Problemi s financiranjem sustava obrane od tuče
3. Zaključak
Literatura
PRILOZI:
Prilog 1 – WMO Executive summary of the statement on weather modification
Prilog 2 – Prikaz prijavljenih šteta od elementarnih nepogoda u razdoblju 1995. - 2016.
Prilog 3 – Prikaz financijskih planova operativne obrane od tuče od 2009.-2018. godine sa stvarnim izvršenjem

**Slika 1.** Struktura dokumenta „Analiza sustava obrane od tuče“ (2018.)

### Sažetak

„Obrana od tuče provodi se u Republici Hrvatskoj više od četrdeset godina i to samo na području sjeverne Hrvatske, no do sada bez dovoljno jasnih pokazatelja o njezinoj isplativosti i učinkovitosti. Prema Zakonu o sustavu obrane od tuče (NN 53/2001), operativnu obranu od tuče provodi Državni hidrometeorološki zavod. Za nadzor poslova operativne obrane od tuče prema istom je Zakonu nadležno Ministarstvo poljoprivrede, a temeljem odredbi čl. 13. Zakona sustav se financira sredstvima iz Državnog proračuna te proračuna

županija s branjenog područja i Grada Zagreba. Obrana od tuče provodi se kombinirano protugradnim raketama i prizemnim generatorima.

Ideja o operativnoj obrani od tuče javila se 60-tih godina dvadesetog stoljeća u bivšem Sovjetskom Savezu. Koncept se temeljio na uporabi meteoroloških radara i ispaljivanju raketa sa zemlje kojima se u oblak unosi reagens (srebrni jodid) čije čestice služe kao umjetne jezgre zaleđivanja. Metoda se brzo proširila na zemlje istočne Europe pa i na tadašnju SFRJ te se 70-tih godina prošlog stoljeća počela provoditi i u Hrvatskoj. Danas u Europi obranu od tuče protugradnim raketama u sklopu nacionalne meteorološke službe imaju samo Rusija i Srbija. U zemljama EU samo u Mađarskoj, Bugarskoj i Rumunjskoj obranu na dijelu teritorija provode agencije pri ministarstvu poljoprivrede, a drugdje, kao na primjer u Austriji i Španjolskoj na privatnu se inicijativu brane samo mala područja i to većinom prizemnim generatorima ili zrakoplovima, bez državnog financiranja. Obrana od tuče ni eksplicitno niti implicitno ne postoji u EU legislativi.

Operativna provedba poslova obrane od tuče radi se samo na području sjeverne Hrvatske od 26.800 km<sup>2</sup> u međurječju Save i Drave iako se pojava tuče bilježi i u ostalim dijelovima Hrvatske. Čak i uz pretpostavku učinkovitosti obrane od tuče, postavlja se pitanje zašto ostali dijelovi Hrvatske nisu obuhvaćeni ovom aktivnošću.

Iskustvo pokazuje da obrana od tuče nije učinkovita u onolikoj mjeri kao što se početno mislilo. Već početkom 70-ih godina prošlog stoljeća, zbog sumnje u učinkovitost protugradne obrane, Svjetska meteorološka organizacija (WMO) je sastavila tim stručnjaka koji su proveli tri velika međunarodna pokusa; jedan u zapadnoj Europi (Švicarska, Francuska i Njemačka), poznat pod imenom „Grossversuch“ odnosno „Veliki pokus“, drugi u SAD-u, poznat pod nazivom „Nacionalni pokus za istraživanje tuče“ (National Hail Research Experiment) te treći u Kanadi. Svaki od tih eksperimenata trajao je čak pet godina, no nije se uspjelo nedvojbeno dokazati da srebrni jodid, na čijem se unošenju u olujne oblake temelji cijela teorija obrane od tuče, pomaže u sprječavanju tuče. Točnije, rezultati su pokazali da nema statistički signifikantne razlike u pojavnosti tuče kod zasijavanih i kod nezasijavanih tučonosnih oblaka. Na temelju tih rezultata mnoge su zemlje ukinule državno financiranu obranu od tuče.

Posljednja istraživanja, koja uključuju i modeliranje oblaka numeričkim modelima, pokazuju da je mogućnost smanjivanja veličine zrna tuče uz povećanu koncentraciju aerosola jednaka mogućnosti da se veličina zrna tuče poveća, što ovisi samo o profilu temperature i vlage u oblaku, koji određuju način na koji će se voda sadržana u oblaku deponirati na jezgre kondenzacije.

Mehanizam nastanka zrna tuče u olujnom oblaku je vrlo složeni današnja ga znanost još uvijek nije u mogućnosti u potpunosti razumjeti. Kod premještanja olujnih oblaka preko nekog područja štete na poljoprivrednim kulturama ne uzrokuje samo tuča nego često i vrlo obilna, intenzivna kiša te jak vjetar. Čak i ako pretpostavimo da je umjetnim djelovanjem moguće smanjiti veličinu zrna tuče, ne može se spriječiti jak vjetar i jaka kiša, koji u velikom broju slučajeva pričine znatnu štetu.

Obrana od tuče je problematična i sa stanovišta očuvanja okoliša, jer tijekom zasijavanja bez ekološke kontrole ispušta reagens sa srebrnim jodidom u slobodnu atmosferu pri tlu

*(generatorima) i po visini (rakete). Uz to postoji i sigurnosni rizik ispaljivanja raketa. Iskustvo je pokazalo da je prilikom djelovanja na formirani tučonosno opasan oblak za njegova cijelog životnog vijeka neophodno prostorno i vremenski kontinuirano djelovanje. Prostorno s obzirom na određena područja zasijavanja, a vremenski kroz cijeli životni vijek oblaka sve dok se ne pokažu znakovi slabljenja i nezadovoljavanja kriterija. U uvjetima u kojima se danas provodi operativna obrana od tuče to nije moguće, jer susjedne Slovenija kao ni veći dio Bosne i Hercegovine nemaju sustavnu obranu od tuče pa je zasijavanje oblaka u kojima je tuča već formirana beskorisno. Učinkovitost obrane od tuče nije dokazana i još uvijek nije poznat načina na koji bi se znanstveno dokazala. Precizne eksperimente u kojima bi se utvrdila učinkovitost obrane od tuče raketama ili prizemnim generatorima zapravo je nemoguće provesti jer je pojava tučonosnog oblaka izuzetno lokalizirana, a i ne postoje dva jednaka oblaka u atmosferi. Stoga rezultati koji bi se dobili zasijavanjem jednog oblaka i bez zasijavanja drugog jednostavno nisu usporedivi.*

*Obrana od tuče bila bi ekonomski opravdana kad bi njezini troškovi bili manji od šteta izazvanih tučom koje je takva obrana spriječila. Problem je, međutim, što ne možemo utvrditi što bi se dogodilo da obrane nije bilo. Tvrdnje da djelovanje raketama ili generatorima smanjuje štetu od tuče, odnosno da bi štete bile još veće da se nije djelovalo, ne mogu se dokazati. I u sezonama s velikim brojem akcija i velikim utroškom raketa i reagensa Model se javljaju štete. Rezultati istraživanja na svjetskoj razini, ukazuju da operativna obrana od tuče kakva se provodi u Republici Hrvatskoj, na razini današnje znanstvene spoznaje, nema uporište u struci i da ne postoje dokazi o njezinoj učinkovitosti i isplativosti. Metode koje nemaju čvrsta uporišta u znanosti, odnosno čije rezultate nije moguće nedvojbeno dokazati, ne treba u praksi ni provoditi.*

*Uzevši u obzir nedokazivost učinkovitosti sustava obrane jedini učinkoviti način smanjivanja štete od tuče je pasivna metoda zaštićivanja mrežama. Pri tom treba naglasiti da je tuča samo jedna od vremenskih nepogoda, a da štete nastale u poljoprivredi to na mnogo većem području, nastaju zbog sve učestalije pojave suše, mraza, leda, poplava itd. U tom smislu bilo bi učinkovitije korisnije usmjeriti sredstva državnog proračuna i lokalne zajednice u sufinanciranje postavljanja zaštitnih mreža i osnažiti sustav osiguranja koji bi osigurao realno obeštećenje u slučaju nastalih šteta od vremenskih nepogoda.*

*U cilju rješavanja ove vrlo složene problematike postojećeg sustava obrane od tuče predlažemo održavanje sastanaka/okruglog stola sa svim relevantnim subjektima kako bi se pojasnile mogućnosti i ograničenja postojećeg sustava obrane od tuče i preporučile učinkovitije mjere za zaštitu i osiguranje“ [1].*

## 2.2. Postojeća obrana od tuče je neučinkovita, neisplativa i potencijalno štetna za okoliš

*U ovom se dokumentu ističe „Još uvijek važeći Zakon o sustavu obrane od tuče stupa na snagu 2001. te je nadzor nad zakonom stavljen u nadležnost Ministarstva poljoprivrede dok je za operativnu provedbu obrane od tuče zadužen DHMZ. Pritom valja naglasiti kako se operativna obrana od tuče provodi samo na području sjeverne Hrvatske i to na površini od 26.800 km<sup>2</sup> u međuriječju Save i Drave. Djelatnost se financira dijelom proračunima županija s branjenog područja i Grada Zagreba, ali i sredstvima Državnog proračuna. Iz tog razloga pitanje*

*sustava obrane od tuče je pitanje šire društvene zajednice, jer se značajna financijska sredstva svih poreznih obveznika ulažu u sustav koji je neisplativ, neučinkovit i nema znanstvenog temelja u recenziranoj i međunarodnoj znanstvenoj literaturi. Pritom predstavlja i opasnost za okoliš jer bez kontrole djeluje na vrlo složeni sustav s nepoznatim dugoročnim učincima na atmosferu“ [2].*

U rujnu 2020. održan je sastanak predstavnika Ministarstva poljoprivrede, Hrvatske zajednice županija, Ministarstva gospodarstva, Hrvatske poljoprivredne komore i DHMZ na kojem je usvojen zaključak o potrebi ukidanja postojećeg sustava operativne obrane od tuče u Hrvatskoj. Nacrt prijedloga zakona o ukidanju Zakona o sustavu obrane od tuče upućen je u zakonodavnu proceduru te je o njemu predviđena rasprava na sjednici Vlade RH zakazanoj za 21.7.2022.

*„Način i organizacija provođenja obrane od tuče u svijetu može se naći u dokumentima Svjetske meteorološke organizacije (WMO) iz kojih je vidljivo kako obranu od tuče protugradnim raketama u sklopu nacionalne meteorološke službe imaju samo Rusija, Srbija te dijelom Kina. U zemljama EU samo u Mađarskoj, Bugarskoj i Rumunjskoj obranu od tuče na dijelu teritorij provode agencije pri ministarstvu poljoprivrede, dok se u nekim zemljama na temelju privatne inicijative i privatnog ili lokalnog financiranja operativna obrana od tuče obavlja zrakoplovima i to na malom ograničenom području (npr. Austrija, Slovenija, Njemačka). U Francuskoj, koja je na prvom mjestu u Europi po proizvodnji i izvozu poljoprivrednih proizvoda, obrana od tuče provodi se kao privatna inicijativa, na području četiri francuske regije i to isključivo prizemnim generatorima. Bitno je naglasiti kako su nacionalne meteorološke službe Slovenije i Mađarske prestale s operativnom obranom od tuče početkom 90-tih godina prošlog stoljeća. Tako je u susjednoj Sloveniji 1989. godine napravljena studija isplativosti sustava obrane od tuče koja je pokazala kako obrana nije imala utjecaja na smanjenje broja dana s tučom, kao i na promjenu režima oborine iz tučonosnih oblaka. Promatranja i modeliranje dovode do općeg očekivanja da će se učestalost tuče povećati u Australiji i Europi, ali smanjiti u istočnoj Aziji i Sjevernoj Americi, dok će se jačina tuče povećati u većini regija. Međutim, te predviđene promjene pokazuju izrazitu prostornu i vremensku varijabilnost. Zbog nedostatka dugoročnih promatranja, kao i nepotpunog razumijevanja procesa i ograničenih studija modeliranja koje dopuštaju konvekciju, trenutni i budući učinci klimatskih promjena na oluje s tučom ostaju vrlo neizvjesni. Buduće studije trebale bi se usredotočiti na detaljne procese i uzeti u obzir nestacionarnosti u proxy odnosima.“*

Na kraju dokumenta daje se popis (linkovi) na relevantne svjetske radove na temu porasta pojave tuče uslijed klimatskih promjena, osvrtu na pokušaje umjetnog djelovanja na nastanak tuče te utjecaja srebrnog jodida na stanje okoliša [3 -16].

### 2.3. Priopćenje DHMZ o sustavu obrane od tuče

Povodom olujnog nevremena s tučom koje je 25. svibnja 2022. na području županija i općina u sjeveroistočnoj i središnjoj Hrvatskoj uzrokovalo značajne štete na poljoprivrednim prinosima, gospodarskim subjektima i imovini građana, Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) izdaje ovo priopćenje:

*„Ovakav tip vremenskih ekstrema i tuče je posljedica prirodnih procesa dodatno pojačanih prisutnim klimatskim pojavama. Nadzor nad provedbom Zakona o sustavu obrane od tuče, koji je na snazi od 31. svibnja 2001. godine (NN 53/01) obavlja Ministarstvo poljoprivrede.*

DHMZ prema tom Zakonu provodi operativnu obranu od tuče i to u skladu s financijskim, tehničkim i ljudskim mogućnostima. Djelatnost se financira sredstvima iz državnog proračuna i proračuna jedinica područne (regionalne) samouprave. U znatno otežanim financijskim i kadrovskim uvjetima provedba svih operativnih poslova obrane od tuče od strane DHMZ-a obavlja se na najracionalniji mogući način na temelju stručnih znanja i dugogodišnjeg iskustva službenika Službi obrane od tuče DHMZ-a. Najsvježiji pregled stanja sustava obrane od tuče prikazan je u Biltenu DHMZ-a za studeni 2021 [17].

Provedena analiza nedvosmisleno pokazuje da operativna obrana od tuče na sadašnjoj tehnološkoj i stručnoj razini nije opravdana, osobito ne na razini financiranja iz Državnog proračuna i u operativnoj nadležnosti DHMZ pri čemu ističemo osobito:

- Ne postoji niti jedan znanstveno utemeljen dokaz da je operativna obrana od tuče kakva se provodi u Hrvatskoj po sadašnjoj tehnologiji učinkovita i gospodarstveno isplativa te da ostvaruje uštede. Svjetska znanstvena i stručna zajednica ne podržava operativnu obranu od tuče, osobito ne na razini nacionalnih meteoroloških službi. Tome u prilog ide i mišljenje Svjetske meteorološke organizacije (WMO), koja jasno navodi da operativna obrana od tuče nema opravdano uporište u znanosti i struci i ne postoje direktni i jasni dokazi o njezinoj učinkovitosti i isplativosti.

- Obrana od tuče je problematična i sa stanovišta očuvanja okoliša, jer se tijekom zasijavanja bez ekološke kontrole ispušta reagens sa srebrnim jodidom u slobodnu atmosferu pri tlu (generatorima) i po visini (rakete).

- Obrana od tuče ni eksplicitno niti implicitno ne postoji u EU legislativi. Obrana od tuče sporadično se radi u organizaciji pojedinih lokalnih zajednica i nije financirana iz državnog proračuna.

- Pitanje obrane od tuče ne dotiče se samo poljoprivrede već cijele zajednice, jer država izdvaja financijska sredstva svih poreznih obveznika na aktivnosti koje nemaju znanstvene temelje u recenziranoj i međunarodnoj znanstvenoj literaturi, nisu uspjele dokazati uspješnost i isplativost te bez kontrole djeluju na vrlo složen prirodni sustav s nepoznatim dugoročnim učincima na okoliš [18].

#### 2.4. Savjetovanje s javnošću o nacrtu prijedloga zakona o prestanku važenja Zakona o sustavu obrane od tuče

Ministarstvo poljoprivrede organiziralo je 31.12. 2020. godine javno savjetovanje (javnu raspravu) o Nacrtu prijedloga Zakona o prestanku važenja Zakona o sustavu obrane od tuče [19] putem Internetske stranice ESavjetovanja. S obzirom da je sustav obrane od tuče uređen Zakonom o sustavu obrane od tuče Odluku o prestanku operativnog djelovanja obrane od tuče donosi Hrvatski sabor, potrebno je izraditi zakon o prestanku važenja zakona kojim je sustav obrane od tuče uređen. Predlagatelj je kao temelj za svoj prijedlog ukidanja sustava navodi rad DHMZ „Analiza sustava obrane od tuče“ iz srpnja 2018. godine. Savjetovanje je bilo otvoreno do: 29.1.2021. U ovoj raspravi svoje pisane priloge su dali Sunčana Pešak (Hrvatski savez udruga ekoloških proizvođača), Marija Keber i Božidar Jureković (kao mali poljoprivredni proizvođači) te meteorolozi Josip Filipović, Zorislav Gerbe



i Zorislav Šubarić. Svih šest sudionika se protivilo ukidanju sustava obrane od tuče, ali svi njihovi prijedlozi odbijeni od strane Ministarstva [20].

No, iako je javna rasprava zaključena daljnje aktivnosti na donošenju zakona o prestanku važenja Zakona o sustavu obrane od tuče nisu provedene.

### 2.5. I novi ravnatelj DHMZ Ivan Güttler je za ukidanje sustava OT

Ivan Güttler smatra da metoda protugradne obrane nije dokazana kao učinkovita te da nosi ozbiljne rizike. *"Određen broj istraživanja pokazuje da te metode funkcioniraju. Druga skupina istraživanja, to je stav i Svjetske meteorološke organizacije, da učinkovitost nije dokazana. Postoji i treća skupina argumenata, vrlo ozbiljna, koja je utvrdila da se u slučaju kad zasijavamo oblake, bilo generatorima, zrakoplovima ili raketama, povećava se rizik od pojave velike tuče i njenih šteta". Isto tako u DHMZ ističu da „Sustav obrane od tuče nigdje u EU-u nije u nadležnosti nacionalnih meteoroloških službi“ [21].*

## 3. DILEME O STAVU DHMZ O OBRANI OD TUČE U HRVATSKOJ

Nakon sustavnog razmatranja izloženih stavova u navedenim DHMZ dokumentima pojavljuju se sasvim određene logičke i znanstveno-tematske dileme. Ovdje će se - zbog ograničenog prostora – samo ukratko ukazati na osnovne nedoumice izazvane stavovima DHMZ. Prije ukazivanja na ova pitanja treba kazati da je djelatnost DHMZ vrlo odgovorna, da je to vrlo složena organizacija sa značajnim brojem zaposlenih od kojih je veći broj sa visokom stručnom spremom te sa znanstvenim statusom.

### 3.1. Nekorektno pozivanje na svjetsku znanost

Da ne koristimo neki vulgarniji izraz ostat ćemo kod pojma 'nekorektno pozivanje' na svjetsku znanost: npr.

- U „Analizi sustava obrane od tuče“ kao relevantan dokument navodi se Izjava Svjetske meteorološke organizacije o promjeni vremena (WMO Statement on Weather Modification) sa sastanka u Abu Dhabiju koji je (a) iz 2010. godine, (b) u kojem se od 13 stranica samo na dva mjesta s ukupno 32 retka spominje tuča i (c) u koljem nema izričitog stava o beskorisnosti zasijavanja oblaka.
- U tekstu „Priopćenja DHMZ o sustavu obrane od tuče“ daje se i popis 14 znanstvenih radova autora iz inozemstva koji (treba) da potkrijepe stav DHMZ o nepotrebnosti sustava obrane od tuče. Međutim – (a) ovi su radovi objavljeni u rasponu od 1986. do 2022. godine, (b) u navedenim radovima nema izričitog stava o nepotrebnosti sustava obrane od tuče, (c) u tim radovima nema navedene isključive štete od nakupljanja srebrnog jodida kao posljedice zasijavanja oblaka.
- Osim toga treba naglasiti i da: (a) nikakav argument nije stav DHMZ da „operativna obrana od tuče kakva se provodi u Hrvatskoj po sadašnjoj tehnologiji ne ostvaruje uštede“ – jer sadašnju tehnologiju diktira DHMZ (a ne neka seljačka radna zadruga); (b) o obrani od tuče pišu zaposlenici (rukovoditelji) DHMZ kojima obrana od tuče nije u prvoj liniji znanstvenog interesa niti imaju objavljenih radova u tome području; (c) pisani tekstovi o OT stručnjaka koji se bave tim pitanjima u DHMZ svedeni su samo na puko statističko



izvještavanje jednom godišnje u Biltenu DHMZ; (d) k tome postoje i stručnjaci meteorolozi koji se bave OT (i imaju akademske stupnjeve i radove na tu temu), a nisu uključeni u izradu ovakvih dokumenata. [22]

- Isto tako – nekritički se i bez ikakvog razumijevanja preporučuju modeli zaštite OT kroz osiguravajuća društva na primjerima iz SAD i drugih zapadnih zemalja. Pri tome se zaboravlja da svaka država ima svoje specifičnosti u strukturi društva, u tradiciji, u strukturi gospodarstva, stanovništva, u demografskim kretanjima, pravnom sustavu, korupciji itd.
- U nastavku nekritičkog poimanja stvari (bez propitivanja argumenata) ministrica poljoprivrede Marija Vučković, kao i u drugi dužnosnici u RH, drži se promoviranog stava DHMZ o znanstvenim dokazima o nekorisnosti obrane od tuče [23].
- Ovdje treba ukazati i na tzv. točki infleksije kada su u pitanju klimatske promjene te na brzinu podvostručavanja civilizacijskoga znanja u nizu oblasti u XXI. stoljeću – kao važnim elementima za razumijevanje (i razmatranje budućih) klimatskih promjena. O tome detaljnije u našoj knjizi „Tri eseja o znanosti“ iz 2008. godine [24].

### 3.2. Što je propušteno

Općenito uzevši - u svim istupima i dokumentima DHMZ nemušto se isprepliću tri pitanja koja nisu razložno razdvojena – a to bi razdvajanje umnogome olakšalo raspravu i iznošenje argumenata te omogućilo razumijevanje problema; radi se o: (a) organizacijskoj povezanosti sustava OT s DHMZ-om, (b) tehnologiji OT i (c) financiranju troškova OT.

Osim toga – iako su pozivali na „*održavanje sastanaka/okruglog stola sa svim relevantnim subjektima kako bi se pojasnile mogućnosti i ograničenja postojećeg sustava obrane od tuče i preporučile učinkovitije mjere za zaštitu i osiguranje*“ – DHMZ (a niti Ministarstvo poljoprivrede) nisu u proteklim godinama organizirali ovakav sastanak na kojemu bi se čula različita ekspertna mišljenja..

Dakle, organizacija poslova obrane od tuče pri DHMZ je važno pitanje koje treba raspraviti odvojeno od drugih pitanja u OT. Mislim da bi postojeća argumentacija bila dovoljna da se donese odluka o izdvajanju OT iz DHMZ u posebnu Agenciju kao kod drugih zemalja u EU. Glede druga dva pitanja (tehnologija OT i financiranje troškova OT) treba stručno raspraviti javno – bez dominantnog utjecaja DHMZ – kojima (kako je praksa pokazala) obrana od tuče predstavlja crvenu krpu zbog koje se već godinama ovaj sustav ne razvija niti unapređuje. I ovdje treba ukazati da u raspravama koje organiziraju DHMZ i Ministarstvo poljoprivrede nisu uključeni mnogi meteorolozi koji se bave pitanjima OT (npr. dr. sc. Bojan Lipovšćak i drugi).

## 4. Zaključak

Naša razmatranja su ukazala na dvije bitne dileme u konglomeratu pitanja o obrani od tuče u Hrvatskoj; na -

- a) Nekorektno pozivanje na svjetsku znanost u potkrijepi stava DHMZ o nepotrebnosti sustava obrane od tuče te nekritičko i bez ikakvog razumijevanja preporučivanje modela zaštite OT kroz osiguravajuća društva na primjerima iz SAD i drugih zapadnih zemalja.

- b) Na nemuštu raspravu DHMZ o pitanjima OT kojom prilikom se u svim istupima i dokumentima DHMZ isprepliću tri pitanja koja je trebalo razložno razdvojiti – što bi umnogome olakšalo raspravu i iznošenje argumenata te omogućilo razumijevanje problema. Radi se o pitanjima: (a) organizacijske povezanosti sustava OT s DHMZ-om, (b) tehnologije OT i (c) financiranja troškova OT.
- c) Glede prvog pitanja - izložena argumentacija DHMZ je dovoljna da se donese odluka o izdvajanju OT iz DHMZ u posebnu Agenciju - kao kod drugih zemalja u EU.
- d) Glede druga dva pitanja (tehnologija OT i financiranje troškova OT) treba organizirati stručnu javnu raspravu.
- e) Upravni odbor Panon instituta za strateške studije iz Osijeka razmotrit će mogućnost organiziranja nacionalne rasprave o rečenim problemima.

## 5. Literatura

- [1] DHMZ - Analiza sustava obrane od tuče - Izvješće i mišljenje o opravdanosti daljnjeg rada sustava obrane od tuče u Republici Hrvatskoj; Zagreb, srpanj 2018. [https://klima.hr/razno/publikacije/analiza\\_sustava\\_OT\\_2018.pdf](https://klima.hr/razno/publikacije/analiza_sustava_OT_2018.pdf) (pristup 9.7.2024.)
- [2] DHMZ - Postojeća obrana od tuče je neučinkovita, neisplativa i potencijalno štetna za okoliš (26. 6. 2023.)  
[https://meteo.hr/objave\\_najave\\_natjecaji.php?section=onn&param=objave&el=zanimljivosti&daj=zn26062023](https://meteo.hr/objave_najave_natjecaji.php?section=onn&param=objave&el=zanimljivosti&daj=zn26062023) (pristup 17.7.2024.)
- [3] Causapé, Jesús et al. Influence of hail suppression systems over silver content in the environment in Aragón (Spain). I: Rainfall and soils. *Science of The Total Environment*, Vol 784, 25 August 2021, 147220
- [4] Causapé, Jesús et al. Influence of hail suppression systems over silver content in the environment in Aragón (Spain). II: Water, sediments and biota. *Science of The Total Environment*, Volume 779, 20 July 2021, 146403
- [5] Fajardo, C. et al. Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 133, November 2016, Pages 433-441
- [6] Agathokleous Evgenios et al. Hormesis induced by silver iodide, hydrocarbons, microplastics, pesticides, and pharmaceuticals: Implications for agroforestry ecosystems health. *Science of The Total Environment*, Volume 820, 10 May 2022, 153116
- [7] Raupach H. Timothy et al. The effects of climate change on hailstorms. *Nature Reviews Earth Environment* 2, 213–226 (2021)
- [8] Allen John T. et al. Understanding Hail in the Earth System. *Reviews of Geophysics*, 58, e2019RG000665. <https://doi.org/10.1029/2019RG000665>
- [9] Wieringa, Jon; Holleman, Iwan. If cannons cannot fight hail, what else? *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 15 No. 6 (2006), p. 659 - 669
- [10] Gavrilov B. Milivoj et al. Is hail suppression useful in Serbia? – general review and new results, *Acta geographica Slovenica*, 53-1, 2013, 165–179





- [11] Kuraži, Diana; Počakal, Damir. Karakteristike zrna tuče u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske. Hrvatski meteorološki časopis, Vol. 51 No. 51, 2016.
- [12] Počakal, Damir et al. Analysis of orographic influence on hail parameters in NW Croatia, International Journal of Climatology, Volume38, Issue15, December 2018, p5646-5658
- [13] Nađ, Julijana et al. Hail characteristics in Serbia based on data obtained from the network of hail suppression system stations. International Journal of Climatology, Volume41, Issue15, December 2021, p6556-6572
- [14] \* \* \*. Can we Tame Storms? (Un)usefulness of Protection Against Hail. <https://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2011/240.pdf>
- [15] Schmid, Paul. On "Grossversuch III," a randomized hail suppression experiment in Switzerland. [https://digitalassets.lib.berkeley.edu/math/ucb/text/math\\_s5\\_v5\\_article-09.pdf](https://digitalassets.lib.berkeley.edu/math/ucb/text/math_s5_v5_article-09.pdf)
- [16] Federer, B. et al. Main Results of Grossversuch IV. Journal of Applied Meteorology and Climatology. Volume 25: Issue 7, 1 Jul 1986, p917-957
- [17] DHMZ - Bilten DHMZ-a za studeni 2021. <https://radar.dhz.hr/~stars2/bilten/2021/bilten1121.pdf>
- [18] DHMZ - Priopćenje o sustavu obrane od tuče 27. 5. 2022. [https://meteo.hr/objave\\_najave\\_natjecaji.php?section=onn&param=objave&el=priopcenja&daj=pr27052022](https://meteo.hr/objave_najave_natjecaji.php?section=onn&param=objave&el=priopcenja&daj=pr27052022)
- [19] Zakon o sustavu obrane od tuče, NN 53/01, 55/07
- [20] <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/EconReport?entityId=15760>
- [21] Güttler; Ivan. Uloga DHMZ u praćenju meteoroloških procesa i obrani od tuče, 25.5. 2022 [https://klima.hr › razno › zanimljivosti › Uloga\\_D...PDF](https://klima.hr › razno › zanimljivosti › Uloga_D...PDF)
- [22] DHMZ - Bibliografija zaposlenika DHMZ u razdoblju 1947.-2006. Zagreb, 2007
- [23] Bilas, Boris - Zbog tromosti Plenkovićevih ministara Hrvatska ostaje bez sustava za obranu od tuče, „Nacional“, 3. 4. 2023. <https://www.nacional.hr/zbog-tromosti-plenkovicevih-ministara-hrvatska-ostaje-bez-sustava-za-obranu-od-tuce/>
- [24] Ivanović, Milan. Tri eseja o znanosti - drugo dopunjeno i prošireno izdanje ISBN 978-953-6032-55-6226, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2008.



## **Problematika urbane odvodnje - primjer poplavnog događaja (Vidrenjak, 2014.) *The problem of urban drainage - the flood event example (Vidrenjak, 2014)***

**S. Maričić<sup>1,\*</sup>, T. Mijušković - Svetinović<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku,  
Osijek, R. Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [smaricic@gfos.hr](mailto:smaricic@gfos.hr)

### **Sažetak**

Praćenjem razvoja globalnih promjena Zemlje uočene su i sve češće pojave urbanih poplava. Istraživani su njihovi uzroci i tražena rješenja za smanjenje tako prouzročenih šteta. U prvom dijelu rada se ukazuje na osnovne utjecajne parametre inženjerskog rješavanja odvodnje pomoću iskustveno dokazanog, jednostavnog izraza za određivanje mjerodavnog protoka odvodnje (racionalne metode). Ilustrativno se razmatraju ITP-krivulje oborina Osijeka te promjene površina na nekim dijelovima grada. U drugom dijelu rada opisana je poplava sa štetom na obiteljskom imanju u naselju Vidrenjak, općine Velika Ludina, koja se desila u lipnju 2014. godine. Analizirani su relevantni meteorološki podatci te postojeći prisutni sustavi odvodnje (naselja, cesta i njiva). Osim što se desila rijetka pojava obilnog pljuska, poplavu i štetu su uzrokovale i lokalne nepogodnosti sigurnom otjecanju. Primjer je to iz kojeg se može naučiti da nepridržavanje standardima struke vodi ugrozi i šteti imovine.

**Ključne riječi:** oborine, ITP-krivulje, poplava, odvodnja

### **Abstract**

By monitoring the development of the Earth's global changes, more and more frequent occurrences of urban floods have been observed. Their causes were investigated and solutions were sought to reduce the damage caused in this way. The first paper part points out the basic influencing parameters of the drainage engineering solution using an empirically proven, simple expression for determining the relevant drainage flow (rational method). The IDF precipitation curves of Osijek and surface changes in some parts of the city are considered illustratively. In the second part of the paper, a flood with damage to the family property in Vidrenjak settlement, Velika Ludina municipality, which occurred in June 2014, is described. Relevant meteorological data and existing drainage systems (settlements, roads and fields) were analyzed. In addition to the rare occurrence of a heavy rain, the flood and damage were also caused by local inadequacies to safe drainage. This

is an example from which one can learn that non-compliance with the standards of the profession leads to danger and property damage.

**Key words:** precipitation, IDF curves, flooding, drainage

## 1. Uvod

Od globalnih promjena našeg planeta već duže vrijeme se ističu: povećanje broja stanovništva, sve veća urbanizacija (prenamjena površina) te klimatske promjene (s nizom pokazatelja), [1, 2]. Jedna od posljedica tih promjena su i veće štete uslijed poplava, a posebice urbanih sredina (vrjednijih sadržaja), [3, 4]. Među stručnjacima je općenito prihvaćeno da će negativni učinci poplava i dalje rasti, te da će najveći utjecaj biti na urbana područja, [5]. Analize su pokazale da povećanje nepropusnih površina za 30%, rezultira dvostrukim povećanjem poplave 100-godišnjeg povratnog razdoblja, a male poplave mogu se urbanizacijom povećati 10 puta, [6]. Rast urbanog stanovništva i širenje nepropusnih površina u kombinaciji s klimatskim promjenama direktni su čimbenici koji značajno doprinose povećanju prijetnje, izloženosti i ranjivosti urbanih sredina na pojavu poplavnih događaja, [5].

## 2. Problematika urbane odvodnje - općenito

Među glavnim uvjetima opstojnosti života na Zemlji je i kruženje vode u prirodi. Porast broja stanovnika, s promjenama proizvodnje hrane i dobara, prati povećanje izgrađenih površina. Time se unose promjene u prirodni (prethodni) ciklus kruženja vode. Na izgrađenim područjima mijenjaju se prirodni tokovi vode, voda je sve više izložena različitim onečišćenjima koja pronosi i taloži duž trase kojom se kreće. Ni za oborine više ne važi da su to čiste vode jer već u atmosferi apsorbiraju u zraku raspršena onečišćenja. Daljnje značajnije onečišćenje oborinskih voda nastaje kontaktom i otapanjem te pronosom površinskih onečišćenja na slivu. Pored ovih novijih i sve izraženijih promjena, poodavno su poznate osobine da su oborine vrlo promjenjive i po količini i po periodičnosti, [7, 8].

Površinsko otjecanje je dio hidrotehnike u kojem se hidrološkim metodama utvrđuje mjerodavna količina oborina i uvjeti površinskog tečenja. Pravilno sagledavanje ovih ulaznih segmenata omogućuje izračun prihvatljivo točnih količina površinskih oborinskih voda koje je potrebno prihvatiti u transportnom sustavu. Topografske osobine područja samo djelomično određuju slivno područje jer su za urbana područja karakteristične i dominantne površine s visokim koeficijentima otjecanja. Stoga su potrebne prethodne detaljne analize izgrađenosti pojedinih područja.

Konvencionalni sustavi urbane odvodnje sastoje se od kanalske mreže kojom se „višak“ površinske vode prikuplja i odvodi izvan gradskog područja. S obzirom da su bazirani na inženjerskim građevinama smatraju se i nazivaju „sivim pristupom“. Kod njega se višak vode smatra smetnjom te je osnovni cilj da se taj višak odvede najkraćim putem i u što kraćem vremenu. Količine oborinskih voda značajno su veće od količina sanitarnih voda pa su za dimenzioniranje sustava mješovite odvodnje mjerodavne oborinske vode. Velike oscilacije u dotocima uzrokuju poteškoće u upravljanju mješovitim sustavima. Zbog

različitog karaktera sanitarnih i oborinskih voda grade se razdjelni sustavi. U dijelu sanitarne odvodnje ovi sustavi su ravnomjerno opterećeni i predstavljaju racionalna rješenja s kontroliranim zbrinjavanjem onečišćenih voda. U dijelu oborinske odvodnje javlja se potreba za gradnjom paralelnog sustava odvodnje koji je primjereniji oborinskom režimu. Ovisno o načinu pročišćavanja i ispuštanja oborinskih voda ovi sustavi mogu biti značajni po veličini i složenosti svojih građevina i uređaja. Zatvoreni sustavi oborinske odvodnje uglavnom se koriste na specifičnim objektima radi sprječavanja otjecanja onečišćenih voda u teren (ceste, industrijski pogoni i sl.). Prirodni recipijenti za ispuštanje oborinskih voda su pretežno postojeći vodotoci ili vode stajačice i rjeđe podzemlje dovoljne upojnosti. [9]

Prikupljanje oborinskih voda u naseljima vrši se pretežno na cestovnim površinama na koje se slijevaju oborinske vode s okolnih slivnih područja. To je uspješno sve do određenog intenziteta oborina kada, slijevanjem većih količina oborinske vode, dolazi do pojave plavljenja u depresijama na nižim kotama slivnog područja te ugroze tamo izgrađenih objekata. Tako nisu neočekivana plavljenja putnih podvožnjaka.

Ispravno dimenzioniranje sustava odvodnje oborinskih voda, bilo s ruralnih površina (travnjaci, livade, zemljišta i sl.) ili pak sa urbanih površina (asfalt, beton, krovovi), pretpostavlja poznavanje oborinskih osobina razmatranog slivnog područja, [9]. No, oborine su stohastičke prirode, nepredvidive i po količini i učestalosti. U inženjerstvu, kod projektiranja oborinske odvodnje urbanih površina, važno je poznavanje oborina jakog intenziteta (trajanja 10 – 60 minuta u funkciji povratnog perioda), koje izazivaju zasićenje kanalske mreže i poplavne događaje, [10, 11]. Kao i druge hidrološke pojave, tako se i oborine mogu promatrati kao slučajni događaji izazvani raznim promjenljivim uzrocima, što je pretpostavka za primjenu matematičkih zakonitosti statistike i vjerojatnosti, [7, 8]. Na temelju tako određenih mjerodavnih oborina, nekog dugogodišnjeg razdoblja mjerenja, proračunavaju se odgovarajući mjerodavni protoci koji su osnova za dimenzioniranje objekta odvodnje. Poznavanje vjerojatnosti jakih oborina, odnosno mjerodavnih intenziteta kratkotrajnih kiša, moguće je putem krivulja vjerojatnosti, odnosno ITP-krivulja (intenzitet - trajanje – povratni period ili vjerojatnost), [8]. Uzorak od 20 godina, statistički gledano, nije dovoljno dugačak period pa empirijske raspodjele mogu sadržavati pogreške, zbog čega je upitna pouzdanost dobivenih rezultata, [11].

Sustavi urbane odvodnje projektiraju se tako da mogu prihvatiti otjecanje nastalo uslijed neke mjerodavne kiše, tj. kiše određenog trajanja i perioda ponavljanja. Najčešće, u našoj hidrotehničkoj praksi, je povratni period za sekundarnu mrežu 1 godina, za glavnu 2 godine, za glavne kanale 5 godina, a za važne dijelove grada i više (10-50 godina). Mjerodavna kiša se određuje na temelju statističke obrade povijesnih kišnih događaja prikupljenih za određeno razdoblje (bar 25-30 godina). Time nisu obuhvaćeni događaji uzrokovani klimatskim promjenama koji su se dogodili nakon izgradnje sustava. Zato sustav odvodnje u novim okolnostima (veće frekvencije i intenziteta kiša), iako projektiran i dimenzioniran po pravilima struke, više puta ne može uspješno prihvatiti višak vode, tj. javljaju se sve češća plavljenja. Konvencionalni sustavi urbane odvodnje imaju dobru stranu jer se projektiraju prema hidrološkim i hidrauličkim modelima (utemeljenim na dobro izučanim fizikalnim procesima) pa tako omogućuju dobro predviđanje ponašanja sustava za izabranu

mjerodavnu kišu. Loša strana im je što se njihovom izgradnjom dodatno povećava udio nepropusnih urbanih površina. K tome, viši stupanj sigurnosti iziskuje višu cijenu izgradnje i održavanja. I ovdje valja naglasiti da potpunu zaštitu od poplava nije moguće postići zbog stohastičke prirode oborina i složenosti urbanog sustava, već se samo može umanjiti rizik od poplava. Uslijed svega toga sve veća je potreba za uvođenjem novih fleksibilnijih rješenja u okviru urbane odvodnje koja mogu odgovoriti na nove, promjenjive uvjete, [4, 12]. Sve su prisutniji tzv. „održivi sustavi urbane odvodnje oborinskih voda“. Oni predstavljaju pristup gospodarenja urbanim vodama baziran na „zelenim“ tehničkim rješenjima te, u kombinaciji s konvencionalnim sustavima odvodnje, pružaju integralna rješenja koja se mogu prilagoditi specifičnim potrebama svakog grada, [4]. Dimenzioniranje transportnog sustava je iterativan postupak definiranja protoka i dimenzija pojedinih elemenata sustava (prema prihvaćenom mjerodavnom dotoku). Koriste se različite metode proračuna ovisno o veličini slivnog područja, točnosti ulaznih podataka i zahtijevanoj točnosti proračuna (teorijske ili empirijske metode, statističke metode ili metode modeliranja cjelovitog sustava). [12]

### 3. Primjeri problema urbane odvodnje

Stara, iskušana metoda određivanja mjerodavnog (maksimalnog) protoka otjecanja, tzv. racionalna metoda, jednostavno ukazuje na suštinu spomenutih problema. Polazeći od bazičnog izraza i njegovih elemenata uočljiva su dva glavna promjenljiva parametra. Često se koristi slijedeći oblik izraza:

$$Q_T = 16,67 \cdot c_p \cdot i(t_c, T) \cdot A$$

gdje su:

- $Q_T$  - maksimalni protok zadanog povratnog perioda ( $m^3/s$ ),
- $c_u = 16,67$  - koeficijent pretvorbe jedinica,
- $c_p$  - reprezentativni slivni koeficijent otjecanja,
- $i(t_c, T)$  - prosječan intenzitet kiše nekog trajanja i povratnog perioda ( $l/min/m^2$ )
- $A$  - ukupna površina sliva ( $km^2$ );

pri čemu je:

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

gdje su:

- $c_1, c_2, \dots, c_n$  - koeficijenti otjecanja različitih vrsta površina, tablica 1,
- $A_1, A_2, \dots, A_n$  - veličine pojedinih vrsta površina.

Globalnim promjenama mijenjaju se i parametri izraza maksimalne količine otjecanja, a to su ulazna oborina i promjena stanja slivne površine. Obje ove komponente utječu na mjerodavni protok prema kojem se dimenzionira sustav odvodnje. Utjecaj je direktan i proporcionalan, što se može elaborirati.

Za primjer se mogu razmotriti ITP krivulje oborina Osijeka. Iz ITP-krivulja koje su napravljene na temelju podataka mjerenja oborina u periodu 1959.-1991. godine i koje su obrađene (prema log-Pearson III raspodjeli), može se očitati podatak za oborinu 15-minutnog trajanja



i petogodišnjeg povratnog perioda - intenzitet u iznosu od 178,64 l/s/ha. Obrada novijeg fonda podataka (period 1996-2020., na isti način) ukazuje na 10%-tno povećanje ove vrijednosti (195,16 l/s/ha). To, prema racionalnoj metodi, odmah ukazuje na veći mjerodavni protok, odnosno govori o smanjenju pouzdanosti efikasne odvodnje, jer se i mjerodavna oborina povećava za 10%. Dakle, javlja se potreba za povećanjem cijevi/kanala odvodnog sustava. U aktualnom dokumentu osječkog Vodovoda (Opći tehnički uvjeti isporuke vodnih usluga iz 2017. godine, članak 35. stavak 2, [13]), navodi se podatak da je, sukladno Vodoprivrednoj osnovi Grada Osijeka, za dimenzioniranje javne kanalizacijske mreže predviđen intenzitet od 188,92 l/s/ha što odgovara pljuskovnom povratnom periodu 5 godina i trajanja 15 minuta. Ne navodi se na koje razdoblje obrade oborina se taj podatak odnosi. Kako je glavovina osječkog odvodnog sustava izgrađena u prošlom stoljeću, prema starim hidrološkim podlogama, a aktualni mjerodavni intenzitet također ne odražava postojeće klimatske uvjete, proizlazi da se svakih nekoliko godina u Osijeku ne treba iznenaditi problemima s odvodnjom uslijed intenzivnih pljuskova. Za veću sigurnost objekti bi trebali biti većih dimenzija što povećava i cijenu njihove izgradnje/rekonstrukcije.

**Tablica 1.** Koeficijent otjecanja prema vrsti površine [9]

KARAKTERISTIKE POVRŠINE	C	KARAKTERISTIKE POVRŠINE	C
Ulice:		Tratine, prirodne površine	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• asfalt</li> <li>• beton</li> <li>• cigla</li> <li>• tucanik</li> </ul>	<p>0,70-0,95</p> <p>0,80-0,95</p> <p>0,70-0,85</p> <p>0,25-0,45</p>	Pjeskoviti teren: <ul style="list-style-type: none"> <li>• ravan, 2%</li> <li>• srednji nagib, 2-7%</li> <li>• strm, 7% i više</li> </ul>	<p>0,05-0,10</p> <p>0,10-0,15</p> <p>0,15-0,20</p>
Šetnice, pločnici i slično:		Teško, manje propusno tlo:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• betonske ili asfaltne</li> <li>• pločnik sa spojnica</li> <li>• mozaik od kamenih ploča i sl.</li> </ul>	<p>0,75-0,85</p> <p>0,70-0,80</p> <p>0,40-0,55</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ravno, 2%</li> <li>• srednje, 2-7%</li> <li>• strmo, 7% i više</li> </ul>	<p>0,13-0,17</p> <p>0,18-0,22</p> <p>0,25-0,35</p>
Krovovi	0,75-0,95		

Pored toga, prenamjena površina (betonizacija) također utječe na probleme odvodnje. Ovaj dio problematike dugo je poznat i ilustrira ga slika 3, [5]. To se može potkrijepiti i konkretnijom promjenom ukupnog koeficijenta otjecanja površinskim promjenama uslijed izgradnje nekog dijela urbane sredine. Primjerice u Osijeku, dijelu grada Uske njive, prije nekoliko desetljeća većina površina je bila pod njivama i travnjacima, dok je danas sve izgrađeno cestama, obiteljskim kućama i zgradama. Prema tablici 1 razvidno je da je došlo do povećanja reprezentativnog koeficijenta otjecanja jer on proizlazi iz parcijalnih koji su se za pojedine površine povećali 2-3 puta. Primjerice i ugrubo, ako je prije bilo 25 % površine urbano, a ostalih 75 % prirodno, ukupni koeficijent otjecanja je bio:

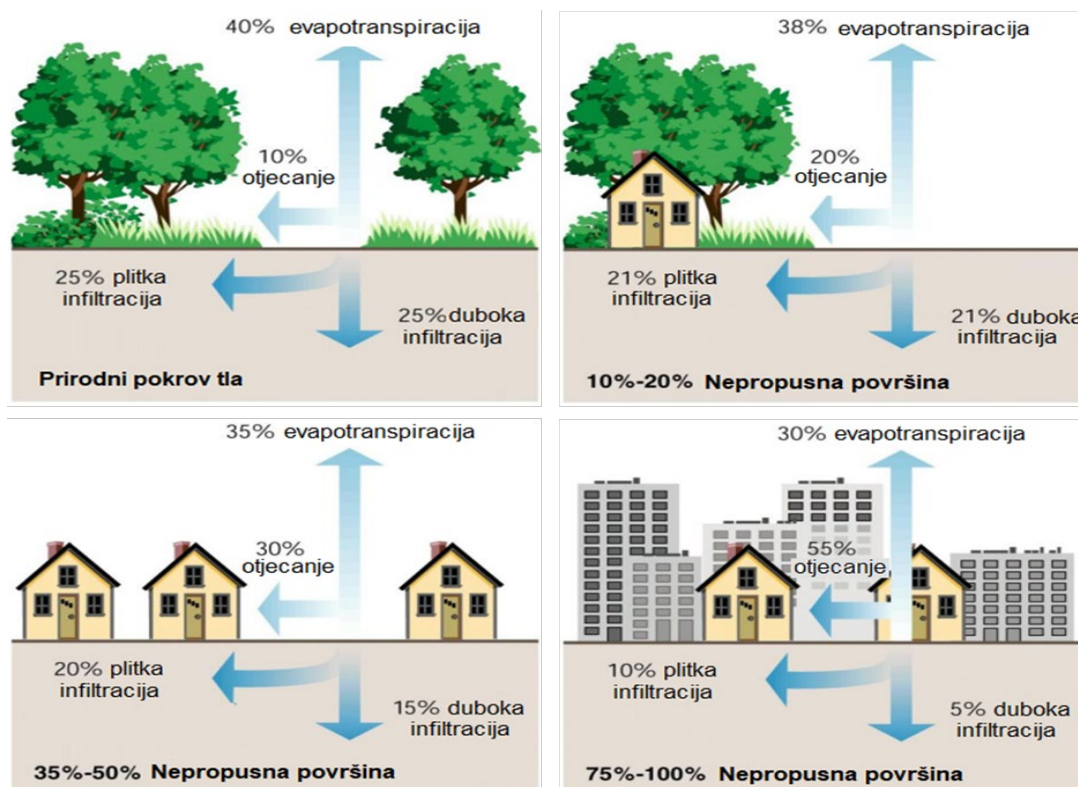
$$((0,25*0,85)+(0,75*0,15))/1=0,325$$

U odnosu na to, danas je situacija recimo obrnuta, 75 % površine je urbanizirano, a ostalo je zadržalo prirodne osobine pa je novi koeficijent otjecanja:

$$((0,75*0,85)+(0,25*0,15))/1=0,675.$$

Dakle, dvostruko je veći što ukazuje i na dvostruko povećanje mjerodavnog protoka s iste, razmatrane slivne površine (Uskih njiva).

Ovdje je primjereno spomenuti da je GUP-om Grada Osijeka propisano minimalno 20-30 % zelene površine za čestice s građevinama raznog tipa [14], što se nerijetko na poštuje, nakon tehničkog pregleda (uporabne dozvole) izvode se dodatne gradnje.



Slika 1. Utjecaj urbanizacije na hidrološki ciklus (prema [5]).

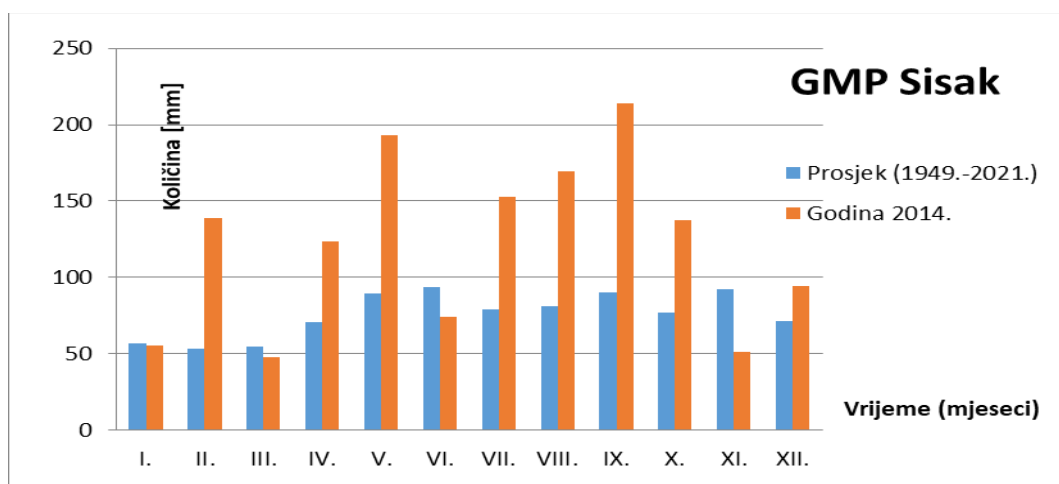
#### 4. Slučaj urbane poplave u Vidrenjaku

Najbolje se uči iz konkretnih situacija, a jedna primjerena je poplavni događaj iz lipnja 2014. godine sa štetom obiteljskog imanja u naselju Vidrenjak, koja je bila i povod sudskog spora. Naselje Vidrenjak nalazi se u općini Velika Ludina, Sisačko-Moslavačke županije. Locirano je na prijelazu brdovitog (Moslavina) u ravničarski (Prisavina) reljef i spaja urbanu zonu sa poljoprivrednom. Predmetno obiteljsko imanje jedno je u nizu imanja uz cestu, koja od glavine naselja Vidrenjak i grada Velika Ludina vodi prema prisavskoj ravnici. Spomenuti urbani dijelovi su na višoj nadmorskoj visini od predmetnog imanja i sve ceste koje vode od njih su u padu prema ravničarskoj dionici. U bliskom okruženju nema instrumenta za mjerenje oborina, a najadekvatnija je službena, glavna meteorološka stanica (GMS) Sisak, udaljena nekih 20-tak kilometara. Općina Velika Ludina jednim manjim dijelom je na poplavnom području Lonjskog polja, što znači da je pod utjecajem površinskih tokova, prije svega velikih voda rijeke Save.

Nemili događaj se zbio 13. lipnja 2014. godina, u kasno popodne, kada je nevrijeme (jaka kiša u trajanju 1-2 sata) izazvala kratkotrajno preplavlivanje kanala i ulice te ušla u kuću i garažu obiteljskog imanja, gdje se zadržala i načinila štetu na zidovima objekata,

namještaju, opremi i alatima (cca 25 000 kn). Za nastalu štetu vlasnik nekretnina je tužio Hrvatske vode smatrajući da su odgovorne zbog „neadekvatnog načina održavanja“ odvodnih kanala. Tuženik ne osporava štetni događaj niti štetu, ali osporava osnov i visinu tužbenog zahtjeva ukazujući na elementarnu nepogodu. Na sudu je došlo do potrebe vještačenja o stanju odvodnog sustava i uzroku poplave te visini prouzročene štete. Radilo se o složenom hidrotehničkom problemu pa je vještačenje radilo više stručnjaka iz čega se došlo do interesantnih činjenica i spoznaja povezanih s ovom događajem.

Nije bilo sumnji da je pala jaka, intenzivna kiša i da je njena voda poplavila površine i predmetno imanje. No potraga za konkretnijim i preciznijim dokazima o tome uglavnom se svodila na usmena svjedočenja. Naime, od službenih mjernih mjesta predmetna kiša je zabilježena na nekoliko bližih lokacija no opća procjena događaja je zahtijevala širi kontekst. S obzirom na raspoložive povijesne podatke mjerenja na tom području i njihovu kvalitativnost, GMS Sisak (98 m n.m.) je reprezentativna za klimatološka obilježja cijelog interesnog prostora. Godišnja suma oborina Siska u višegodišnjem prosjeku (1949.-2021.) iznosi 908,6 mm. Oscilacije u pojedinim godinama su znatne. Tako je npr. tijekom 2014. godine palo 1450,8 mm kiše, a vrlo sušna je bila 2011. godina sa svega 554,9 mm oborina. Prema ocjeni godišnjih odstupanja temperature i oborina od višegodišnjeg prosjeka (1961.-1990.), u posljednjih dvadeset godina, jedino je 2014. bila ekstremno topla i ekstremno kišna. Ocjene mjesečnih odstupanja ukazuju na vrlo kišni svibanj i gotovo prosječno kišni lipanj, dakle u svibnju (sa 193 mm) je bilo 236 % oborine više od referentnog prosjeka. Povratni period ovakvih mjesečnih oborina je bio za svibanj 8,3 godina. Za razliku od veljače, travnja, svibnja, srpnja, kolovoza, rujna i listopada 2014. godine, gdje su evidentirana ekstremna odstupanja od prosjeka, lipanj (kada se desila predmetna poplava) je, na mjesečnoj razini, bio čak ispodprosječan, slika 3.



**Slika 2.** Usporedba mjesečnih oborina predmetne 2014. godine i prosjeka za period 1949.-2021. za meteo-postaju Sisak

Što se tiče konkretne dnevne kiše koja se desila u večernjim satima 13. lipnja 2014. godine količine su im evidentirane za datum 14. lipnja (u 7,00 sati za protekla 24 sata) u iznosu oko 7 mm, tj. 7 litara po četvornom metru površine, kako za područje Siska, tako i za područje

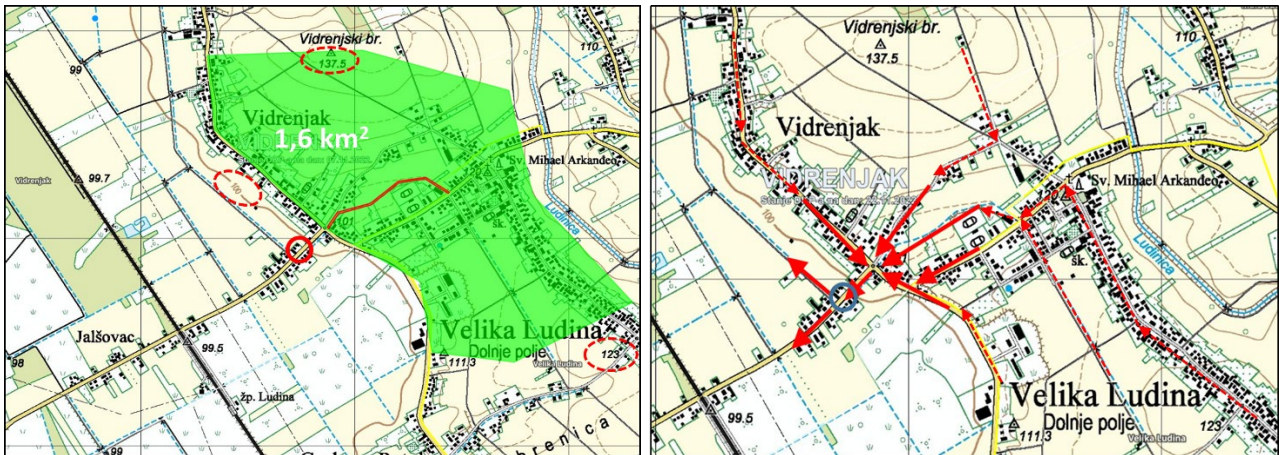


Bjelovara. S obzirom na maksimalno zabilježene dnevne kiše (npr. 31.07.1996. – 114,6 mm) to nisu neke značajnije količine registrirane tijekom 24 sata. No, to ne znači da se nešto dalje od lokacija mjerenja nije desila puno značajnija kiša koja je lokalnog karaktera, što znači da je pala na manje rasprostranjenu površinu, kakve su tzv. konvektivne oborine. U prilog tome govore neki zapisi, [15], organizacija koje se bave vremenskim prilikama, za predmetni datum: *Zagrebačko područje je u petak, drugi dan zaredom zahvatilo jače grmljavinsko nevrijeme, praćeno jakim vjetrom, a bilo je i dojava o tuči. Najizraženije je bilo nad zapadnim dijelom grada, gdje je između 17 i 18 sati pala veća količina kiše. Na meteorološkoj postaji Trešnjevka je u tridesetak minuta palo čak 48 litara kiše. Obilna kiša u kratko je vrijeme poplavila ulice. ... Na službenim zagrebačkim meteorološkim postajama je palo manje kiše. Na Griču 15 litara, dok je na istoku grada (Maksimir) palo tek 4.5 litara kiše. ... Veću količinu kiše bilježi i meteorološka postaja kod Požege. Ukupno su pale 53 litre, od čega gotovo polovica u tridesetak minuta (od 19.00 do 19.30 sati). Na obližnjoj postaji Velika palo je 38 litara kiše.* U ovim meteo-zapisima spominju se intenzivni pljuskovi sa iznosima od 20 do 55 mm (ili litara) kiše po četvornom metru u roku pola do jedan sat. Ti nevremenski pljuskovi su lokalnog karaktera jer su navedene vrijednosti zabilježene samo u njihovoj blizini, a njima sličan pljusak uzrokom je predmetnih poplavnih problema u Vidrenjaku. Slijedom iskazanog u zapisima, vjerojatno je u predmetnom području tada palo preko 20, izvjesnije 40-55 l/m<sup>2</sup> kiše, a možda i više, u roku od 30-60 minuta. Za dnevnu kišu to su povratni periodi od 20 do preko 100 godina, a za onu trajanja do 60 minuta radi se o povratnim periodima od 15 do 400 godina (prema ITP krivuljama oborina Siska, za razdoblje 1951.-1978., Bonnaci O.). Iako je obuhvaćen raniji period, nakon kojeg su klimatske promjene okarakterizirane izražajnijim ekstremima, ipak se može konstatirati da je predmetni događaj (kiša) bio male vjerojatnosti, tj. većeg povratnog perioda ( $T \geq 15$  godina), dakle radilo se o rijetkom prirodnom događaju kratkotrajne kiše velikog intenziteta.

Prema geografskim kartama uočljive su visinske kote i slojnice područja smještaja spomenutih naselja iz čega se može razaznati usmjerenost i veličina padova terena i putova s okolnim kanalima. Najbliži brjegovi imaju nadmorsku visinu od 137,5 i 141 m. Brijeg povrh Vidrenjaka pada na 100 m. n.m. na putu od oko 750 m direktne udaljenosti. S detaljnije topografske karte moguće je odrediti padove po pojedinoj promatranoj trasi i zaključiti kuda teče voda površinom i postojećim koritima. Karta omogućuje i određivanje aproksimativne slivne površine s koje se voda prikuplja i sutiče u ukupno otjecanje početkom ulice gdje je lokacija predmetne parcele. Ta slivna površina je procijenjena na 1,6 km<sup>2</sup>. Utvrđena je i činjenica da se na glavnom raskrižju naselja Vidrenjak (koje spaja nekoliko ulica) sutiču dotoci vode s viših pozicija iz pet izraženijih smjerova.

Također je utvrđeno da u okolici predmetne parcele postoje pločasti i cijevni propusti na kanalima oko ceste u predmetnoj ulici. Oni su raznih dimenzija otvora propusta i duljine putnog prijelaza (promjeri cijevi propusta su  $D = 30, 60, 80$  i  $100$  cm, a duljine prijelaza se kreću od 6 do 33 metra). Konstatirano je i da su čestice nasuprot predmetnoj parceli na drugoj strani ulice, više nadmorske visine i uz njih je veći kanal.

Kada se napune kanali uz ceste, voda teče površinski i usmjerava se vođena najmanjim otporima prema nižim lokacijama (terenima, ulegnućima, bazenima, podrumima i sličnom).



**Slika 3.** Kote reljefa, površina sliva i glavni smjerovi koncentracije otjecanja oborina

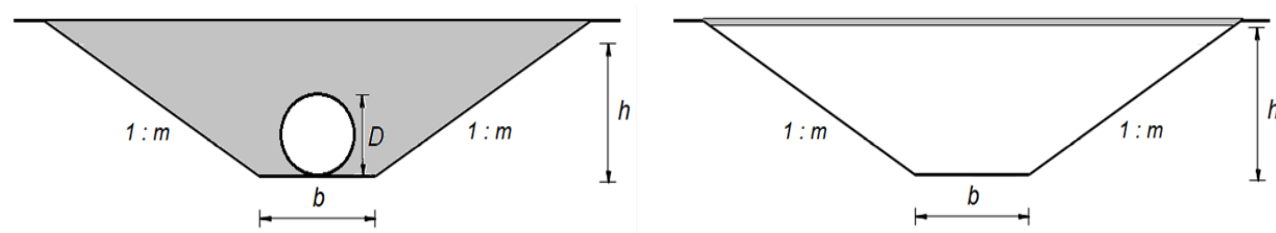
Nasuprot predmetne parcele nalazi se par parcela veće površine (oko 3 000 m<sup>2</sup>) s kojih voda lako prelazi trasu kanala jer je tu izvedena ploča propusta velike dužine (preko 33 metara). Ta voda svojim tokom skreće, uzvodno formirani tok niz ulicu, upravo prema predmetnoj parceli, a ispred nje je površina propusta nastala spajanjem dvaju cijevnih propusta i njihovim međuprostorom, ukupne dužine oko 19,5 metara. To pospješuje površinsko otjecanje prema i niz predmetnu parcelu koja je niža u odnosu na cestovnu površinu.



**Slika 4.** Uvjeti otjecanja na užoj lokaciji (duga zacijevljenost kanala, „betonizacija“, padovi)

Sve to je omogućilo analizu otjecanja kanalima. Kanali uz cestu ulice u kojoj je došlo do poplave su trapeznog profila i nagiba pokosa 1:1, a razlikuju se po širini dna i dubini kanala: Jedan kanal je širine dna 0,5 m i dubine 0,7 m, i taj prolazi stranom na kojoj je predmetna kuća, (tip A), a drugi kanal, na suprotnoj strani ceste, širine je dna 0,6 m i dubine 1,25 m, (tip B). Prema izračunima je konstatirano da kroz oba kanala (A+B) koji postoje uz cestu u razmatranoj ulici i prolaze pored predmetne (tužiteljeve) parcele, može maksimalno protjecati oko 4,4 m<sup>3</sup>/s i to u slučaju da su pravilno održavani i da su cijelom dužinom njihova korita bez smetnji uzrokovanih postojanjem propusta (putnih prijelaza) na njima. Postojanje cijevnih propusta predstavlja dodatni hidraulički otpor tečenju. On je znatno manji kod pločastog tipa prijelaza (gotovo neprisutan dok se ne dosegne donji rub ploče), a izraženiji

što je manji cijevni otvor (kod okruglog tipa). Taj otpor se ogleda u vidu stvaranja uspora tečenja na potezu uzvodno od ulaza u propust. Veličina tog uspora zavisi od dolaznog protoka u kanalu, o „zamuljenosti“ cijevnog propusta, hidrauličke hrapavosti betonskih cijevi te o uvjetima otjecanja kanalom nizvodno. Što je manji promjer otvora i veća duljina zacjevljenja propusta to je veći utjecaj na propusnost, tj. kanalski sustav može provoditi manju količinu vode (bez razlijevanja izvan korita). Prema hidrauličkom izračunu, ako se uzme da ukupni kapacitet daju oba kanala (A+B) i to s najvećim utjecajem na svakom od njih, može se konstatirati da već kod 1,80 – 1,90 (m<sup>3</sup>/s) nastupa izlijevanje vode iz korita kanala zbog putnih cijevnih propusta. Znači da propusti smanjuju kapacitet sustava za preko 55 % u smislu provodljivosti bez poplavne opasnosti (razlijevanja).



**Slika 5.** Osnovni proračunski elementi cijevnog i pločastog propusta na kanalu

Daljnja hidrotehnička analiza bavila se procesom transformacije kiše u otjecanje, tj. uslijedio je proračun najvećeg protoka uslijed prethodno usvojene kiše (50 l/m<sup>2</sup> u 30-60 min) na definiranom slivu (1,6 km<sup>2</sup>). Kao prikladna, upotrijebljena je racionalna metoda pri čemu su za utvrđenu slivnu površinu procijenjene parcijalne površine (za 35 % urbano - c=0,8 ; za 65% poljoprivredno - c=0,2) te izračunat prosječni koeficijent otjecanja u iznosu preko 0,4 (moglo se uzeti i više jer su poljoprivredne površine bile pod bujnom vegetacijom i tlo je tijekom prethodnog perioda bilo dobro natopljeno kišama). Iz takvih podataka mogla se izračunati vrlo izvjesna količina vode koja je u razmatrano vrijeme (predveče, 13.06.2014.) pritjecala do predmetne lokacije. Dakle, sa sigurnošću se može ustvrditi da se radilo o količini od preko 4000 l/s tj. 4,0 m<sup>3</sup>/s oborinske vode, a to je količina koja ni kroz potpuno nepremošćavana korita kanala kod predmetne lokacije nije mogla proteći bez razlijevanja po okolnim površinama. Kako na kanalima postoje brojni propusti razvidno je da ni pola te količine nije moglo proći bez razlijevanja i tečenja duž kolnika i pješačkih staza.

Analiza nizvodnih elemenata odvodnog sustava ukazala je na činjenicu da se oni nalaze na nižem terenu te da nisu ometali otjecanje, a ni vodostaji Save nisu imali visoke vrijednosti. Nizvodni melioracijski sustav odvodnje, uz sve nedostatke i društveno-ekonomske okolnosti, zadovoljavajuće je održavan (prema starom, ali važećem Pravilniku, [16]). Konačno je zaključeno je da postojeći odvodni sustav takvu kišu (ekstremno intenzivnu, obilatu i kratkotrajnu) nije mogao provesti mimo predmetne lokacije bez razlijevanja vode oko kanala i formiranja površinskog toka vode po kolniku i nogostupu. Taj površinski tok usmjeravao se prema prisutnim uvjetima, niz najveći pad i najmanje otpore, a za predmetnu lokaciju evidentne su tri važne činjenice, koje su dale doprinos uzrokovanju poplavnih problema. Prva je da su predmetne nekretnine na nižim kotama od kota ceste i nasuprotnih parcela (lociranih preko ceste). Druga je da su kod predmetne parcele, s obje strane ceste,



kanali nadsvođeni dugim pristupnim površinama (uz parcelu 19,5 m, s druge strane 33 m). Treća je da nasuprotne parcele, koje su više od ceste, imaju velike površine sa slabopropusnim pokrovom (velikim koeficijentom otjecanja). To uzrokuje izvjesno pritjecanje vode s nasuprotnih parcela preko betonske ploče prijelaza (od 33 m), skretanje prispjelog toka prema predmetnoj parceli i lako otjecanje dijela toka niz prijelaz (od 19,5 m) te niz izbetonirani dio dvorišta do površina nekretnina (garaže i kuće tužitelja), i konačno, zbog podnih ploča u razini terena te otvorenih vrata lako utjecanje pa „zarobljavanje“ vode unutar zidova nekretnina.

## 5. Zaključak

Povećanjem učestalosti i intenziteta kiša uslijed klimatskih promjena povećava se poplavna opasnost, koja posebno velike štete može imati u urbanim sredinama. S druge strane, urbanizacija je proces u stalnom uzlaznom trendu, što znači da se povećavaju koeficijenti otjecanja sa sliva te se i tako povećava poplavna opasnost. Apsolutne zaštite od poplava nema, a povećanje stupnja zaštite (kapaciteta odvodnje) značajno povećava troškove izvedbe i održavanja odvodnih sustava. Trendove ova dva ugrožavajuća elementa treba pratiti te prilikom sanacija ili adaptacija nastojati prevenirati buduća krizna stanja. To znači da elemente izvedenih sustava, koji su projektirani na osnovu hidroloških parametara prethodnog razdoblja, treba povećavati ako su trendovi porasta oborina i/ili urbanizacije, želi li se zadržati usvojeni stupanj sigurnosti. Ekonomskim analizama (šteta i ulaganja) treba odrediti projektne elemente sustava odvodnje (prvenstveno trajanje i povratni period mjerodavne kiše), što može povećati ili smanjiti stupanj sigurnosti od poplave.

Stvarne situacije s poplavnim ishodom, popraćenim štetom, mogu poslužiti za uočavanje presudnih elemenata uzrokovanja poplave. Iz predstavljenog primjera može se naučiti koji su lokalni elementi doprinijeli poplavi i šteti te kako ih općenito izbjeći. Dobro je podnu ploču građevine podići od terena (barem tri stepenice). Treba podrumске otvore osigurati od utoka površinskih voda (izdići otvore od terenskih površina). Putni propusti trebaju biti adekvatnih dimenzija, a prednost treba dati pločastim propustima jer su manja smetnja protjecanju od cijevnih. Opasnost povećavaju i mali promjeri cijevi propusta zbog lakog začepjenja. Zato, a i zbog lakšeg održavanja, se ne preporučuje manji promjer propusta od bar 30 cm. Alate, pribor, opremu i slično treba uvijek držati na povišenom, iznad moguće opasnosti od vode, jer ona zna iznenaditi (stohastičkog je karaktera).

## 6. Literatura

- [1] Glavač, Vjekoslav. Uvod u globalnu ekologiju. Državna uprava za zaštitu prirode i okoliša i Hrvatske šume, Zagreb, 1999.
- [2] Metz, Bert. Controlling Climate Change. Edinburgh: Cambridge University Press, 2010. (ISBN 0521764033)
- [3] Prosdoci, I.; Kjeldsen, T. R.; Miller, J. D.: Detection and attribution of urbanization effect on flood extremes using nonstationary flood-frequency models // *Water Resources Research*, Volume 51, Issue 6, Jun 2015., pp. 4244-4262, (doi:10.1002/2015WR017065), (ISSN 0043-1397)

- [4] Potočki, Kristina; Vouk, Dražen; Kuspilić, Neven. Smanjenje rizika od poplava u urbanim sredinama pomoću integralnih zelenih rješenja (Reduction of flood risk in urban areas with integral green solutions) // Zbornik radova (Hrvatska platforma za smanjenje rizika od katastrofa) / Holcinger, Nataša (ur.). 2018., str. 70-75. (CROSBI ID 671570)
- [5] Jha, Abhas; Lamond, Jessica; Bloch, Robin; Bhattacharya, Namrata; Lopez, Ana; Papachristodoulou, Nikolaos; Bird, Alan; Proverbs, David; Davies, John; Barker, Robert // Five feet high and rising: cities and flooding in the 21st century / The World Bank, Policy Research working paper 5648, May 2011
- [6] Hollis, G.E.: The effect of urbanization on floods of different recurrence interval // Water Resources Research 11 (1975) 3, pp. 431-435.
- [7] O. Bonacci, Oborine: glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus, Geing, Split, Sveučilišta u Splitu i Osijeku, Split 1994. (ISBN 953-96059-1-1)
- [8] Žugaj, Ranko. Hidrologija. udžbenik Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2000. (ISBN 953-96303-7-1)
- [9] Margeta, Jure. Kanalizacija naselja - odvodnja i zbrinjavanje otpadnih i oborinskih voda. Sveučilište u Splitu – Građevinsko-arhitektonski fakultet Split, 2009. (ISBN 978-953-6116-37-9)
- [10] Hurford, A.P.; Parker, D.J.; Priest, S.J.; Lumbroso, D.M.: Validating the return period of rainfall thresholds used for Extreme Rainfall Alerts by linking rainfall intensities with observed surface water flood events // Journal of Flood Risk Management 2012. Volume 5, Issue 2, p. 134-142,  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1753-318X.2012.01133.x>
- [11] Patrčević, Vladimir; Đurin, Bojan; Kuharić Ivan. Analiza intenziteta oborina za dimenzioniranje objekata odvodnje oborinskih voda prostora grada Daruvara (Analysis of intensity precipitation for the dimensioning of drainage facility of rainfall on the area town Daruvar) // Inženjerstvo okoliša (2015) / Vol. 2, No. 2, pp. 103-110 (ISSN 1849-4714)
- [12] Babić, Sergije; Ožanić, Nevenka. Proračun oborinske odvodnje u urbanim područjima – Retencijska metoda (Calculation of Rainwater Drainage in Urban Areas – Retention Method) // Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci – knjiga XI / Ožanić, Nevenka (ur.) / (ISBN 987-953-6953-14-1), Rijeka, lipanj 2008. str. 9-30
- [13] Opći tehnički uvjeti isporuke vodnih usluga; 2017., Vodovod d.o.o. Osijek;  
<https://vodovod.com/zakoni-i-propisi>
- [14] GUP Grada Osijeka // Službeni glasnik Grada Osijeka br. 6A od 12. travnja 2018. (Generalni urbanistički plan Grada Osijeka, APE d.o.o. za arhitekturu, planiranje i ostale poslovne djelatnosti, Zagreb). <https://www.osijek.hr/urbanisticki-planovi/generalni-urbanisticki-plan-grada-osijeka/gup-go-procisceni-tekst-2018/>
- [15] <https://radar2.dhz.hr/~stars2/bilten/2014/bilten0614.pdf> ; <https://www.crometeo.hr/i-petak-donio-lokalno-vrlo-obilne-pljuskove/>
- [16] Pravilnik o tehničkim, gospodarskim i drugim uvjetima za uređenje sustava melioracijske odvodnje, te osnovama za tehničko i gospodarsko održavanje sustava (NN, br. 4/98.)

# Green Roofs as a Means of Stormwater Management in the Sustainable Reconstruction/Rehabilitation of Prefabricated Concrete Buildings

L. Ben Khadra<sup>1,2\*</sup>, J. Pál-Schreiner<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Marcel Breuer Doctoral School, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs,

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Institute of Smart Technology and Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs

<sup>3</sup>Modern, Ecological Systems of Water Management and Green Surfaces Research Team, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs

\* Corresponding Author. E-mail: ben.khadra@mik.pte.hu

## Abstract

Nowadays, short-term, high-intensity rainfall, which occurs more and more frequently in cities of the 21st century due to climate change, poses a difficult task for engineers. In urban environments, rainwater cannot drain away in dense built-ups, and the sewerage system cannot accommodate the sudden stormwater. The flash flood resulting from the above causes severe problems in the population's lifestyle and quality of life. In our research, we examine how it is possible to reduce flash flooding and improve the microclimate of the building, supply the residents with grey water and provide the building's power supply with solar panels by applying green roofing instead of traditional roofing and combining it with rainwater tanks and solar panels. In Pécs, in southern Hungary, many multi-story prefabricated concrete buildings were built in the 1970s and 80s. Their renovation and modernization will be crucial soon. Our paper presents alternative energy-efficient, economical renovation solutions to create a more liveable and sustainable environment.

**Keywords:** Urban Life Sustainability, Stormwater Management, Green Roof, Multi-story Prefabricated Concrete Building, Reconstruction

## 1. Introduction

The worldwide trend of urbanization has significantly impacted urban hydrological conditions, leading to an escalating severity of urban waterlogging and flooding disasters [1]. Recognizing the potential for diverse damages and societal impacts, urban stormwater management has become a pervasive concern [2]. The uncertainties surrounding future urban stormwater management are further compounded by the influence of climate change, which profoundly affects the global water cycle. The dynamic relationship between climate change and urbanization intensifies water-related challenges such as water scarcity and

flooding, emphasizing the urgent need to prioritize safeguarding natural water resources in urban planning and development.

The rapid expansion of impermeable surfaces, a direct result of extensive urbanization, has disrupted the natural hydrologic cycle, leading to a host of severe repercussions. These include flooding, runoff pollution, degradation of the water environment, and ecological harm. It's clear that traditional stormwater management methods are inadequate in the face of these challenges, falling short of the objectives of sustainable urban development [3]. Using green roofs provides opportunities in urban stormwater management, providing a natural solution to these challenges. Green roofs enhance water management by absorbing and retaining stormwater. They are crucial in reducing flashflood runoff and promoting sustainable water use in urban environments.

Flash floods are distinguished from other floods primarily because they occur within a few hours due to high-intensity rainfall falling over a small catchment area. Their formation and course lasts for a few hours; in extreme cases, rainfall of up to 100 mm can fall on a given region. Flash floods are characterized by being entirely concentrated both in space and time and in terms of spatial extent, we can think of an area of 10-200 km<sup>2</sup>. The phenomenon has two components: meteorological and hydrological. Flash floods are meteorologically related to convective precipitation systems, i.e. showers and thunderstorms when thunderstorms arranged in a line move one after another. As a result, some areas can receive very high amounts of rainfall, while there is often little rain at a short distance from the line. As a result of thunderstorms, more than 10 mm of precipitation falls in a few hours, and the surface cannot handle, absorb or properly drain it at such a fast pace. Such intense precipitation events can occur in almost any month of the year. The hydrological component consists of topography and soil conditions. The most vulnerable are mountains and hills, where a sudden change in the slope of the topography causes runoff bodies to slow down and become congested. Sparse vegetation, a high proportion of impermeable layers, soil binding, or a lack of maintenance of the storm drainage system also contribute to the creation of flash floods. Cities are at increased risk because dense urban build-up and a high proportion of paved surfaces prevent water infiltration and increase the risk of rapid surface runoff [4].

Green roofs are installed on building rooftops to create appealing green spaces in urban areas. A typical green roof comprises a growing medium topped with vegetation and a filter layer, drainage layer, protection layer, root barrier, and waterproofing over a roof deck [5]. Green roofs feature a thin layer of soil supporting low-maintenance, drought-resistant vegetation. For numerous years, green roofs have functioned as effective stormwater control mechanisms. The substrate and the drainage course can stock a great amount of water, without overloading the sewage network. They successfully mitigate and postpone the peak runoff of rainfall by storing a fraction of the rainwater within soil layers, thereby facilitating plant utilisation [6]. By evaporation, the high humidity of the structures offers a pronounced cooling effect too. Plants on green roofs help filter out pollutants from the water. Stormwater runoff samples from green roofs show that they have reduced the number of heavy metals.

This data suggests that green roofs filter and absorb pollutants. Usually, these materials would have ended up straight into stormwater tanks, sewers, or natural watersheds. Stormwater tanks serve as reservoirs for collecting, retaining, and future use of stormwater runoff. The purpose of these reservoirs is to reduce flood risk and overcome water scarcity. For the above reasons, we can create a sustainable water management method by collecting water runoff from green roofs and later reusing it.

## **2. Materials and methods**

### **2.1. Climate of the studied area**

The studied area is in Pécs. Pécs is located on the southwestern edge of Hungary, near the Croatian border, 45-50 km west of the Danube. The city is open from the south and protected from the north by Mecsek Hill. From the average height of the Pécs-plain between 120-130 meters AMSL, it rises abruptly to 400-600 meters AMSL. The geographical position of Pécs is exceptionally favorable from a climatic point of view, on the border of the still significantly forested area. In the evenings on sultry summer days, the airflow from Mecsek Hill cools and purifies the city's air. The hill is divided by several valleys, significantly improving a city's atmosphere without a warm climate. The waters coming down from Mecsek Hill are collected by the Pécs-creek running in the northeastern-southwestern direction and channeled into the Black Stream, which flows into the River Drava.

The city is affected by three climatic influences: continental, Mediterranean and oceanic. The oceanic climate exerts its influence from the west, the dry continental climate from the northeast, and the Mediterranean climate from the south, thanks to which Pécs is located in the buffer zone of three climate types. Looking at the average monthly temperatures of Pécs for many years (1991-2020), it can be said that January is the coldest month, while July is the warmest, which precedes the month of August by only one-tenth of a degree. The average annual heat fluctuation is 21.7°C [7]. The average annual rainfall in Pécs is 673 mm, a typical annual trend. In terms of precipitation, less precipitation falls in the winter semester (October-March), the annual amount is almost 40%, the wettest winter month is December, and the least precipitation falls in January and March. The wettest period is from May to June, and June is the wettest month of the year and summer semester [8]. As seen in Figure 1, Pécs is located in one of Hungary's most vulnerable areas from the point of view of flash flooding due to its meteorological and hydrological conditions.

### **2.2. Pécs Szigeti District Details**

The studied area is located within the Pécs-Szigeti district, bordered by Alkotmány Street, Petőfi Sándor Street, Dr. Nagy Jenő Street and Rókus Street (Figure 2). The area has mostly late-1970s prefabricated concrete buildings. The area also faces air pollution, frequent flash floods, and increasing heat waves and heat islands due to insufficient green areas. Within the area, the University of Pécs has several institutions, such as kindergartens, primary and secondary schools, and other service institutions.



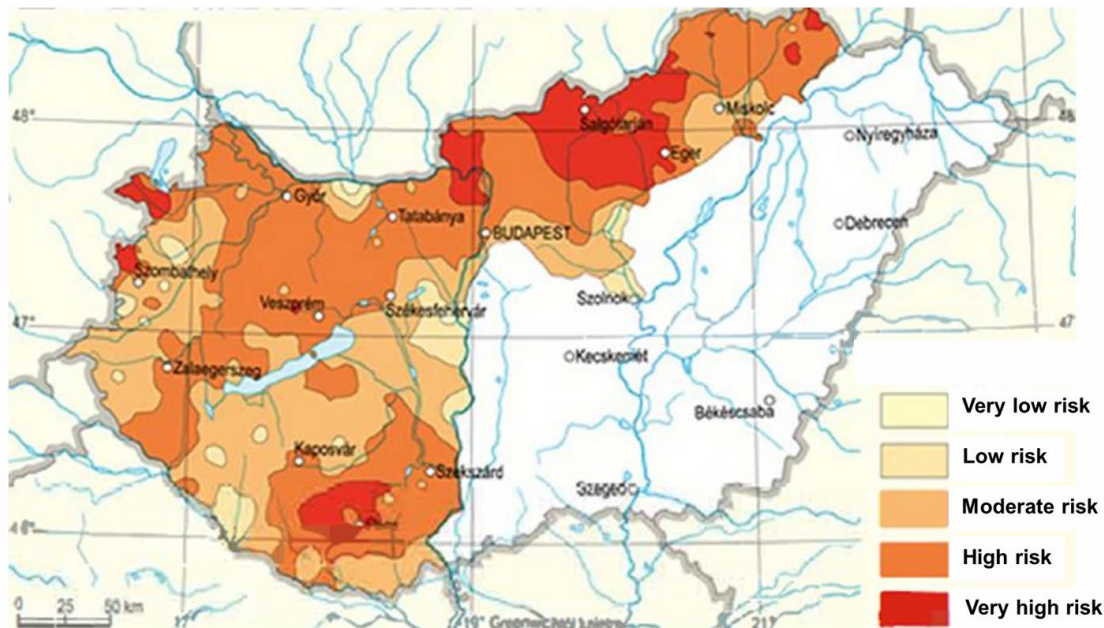


Figure 1. Flash flood risk in Hungary [4]

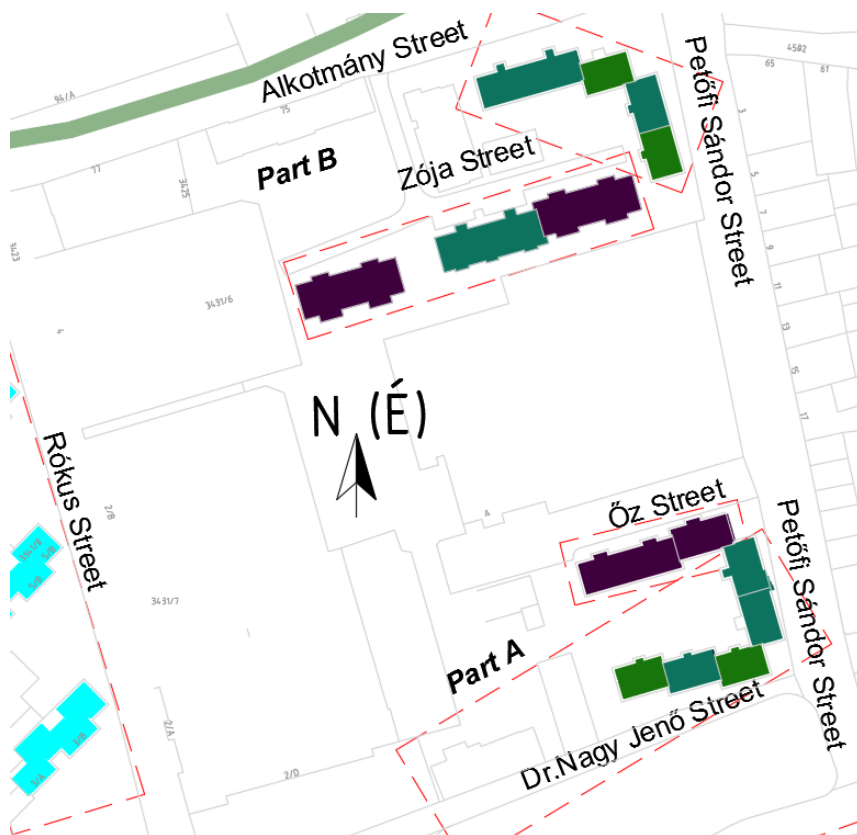


Figure 2. Site Plan

Within the research, we only dealt with prefabricated concrete buildings. The panel buildings examined were divided into two parts based on their location. Part A is in the southern part of the area, bordered by Dr. Nagy Jenő Street, Petőfi Sándor Street and Óz Street. We marked and numbered those buildings, where part A includes five five-story buildings in this section in green and three ten-story buildings on the northern side of the area in purple.

Part B is located on the northern side of the area, bordered by Alkotmány Street, Petőfi Street and Zója Street. We marked seven of the five-story buildings in this section in green and four ten-story buildings in purple. See Figure 2.

Some of the buildings were built tightly connected in both parts. Since our goal is to provide individual solutions for each type of building, we calculated the buildings separately for each type, regardless of whether they stand individually or are connected. The five-story buildings have a floor area of 209 m<sup>2</sup> and 15 apartments. The apartments are close to the university town, and therefore, nowadays, they are typically inhabited not by the owners but by tenants. Due to the above, we calculated two people per apartment and 30 inhabitants per house. The ten-story building has a floor area of 202 m<sup>2</sup> and 31 apartments, with 62 people per building.

### 2.3. Rainwater harvesting

The buildings under consideration were built in the late 70s. Apart from external thermal insulation, no other renovations have been carried out with them. Examining roofs, we dealt with two options. One option is to renovate the roof's structure and insulation to collect rainwater like a traditional roof. The other option is to create a green roof during the renovation, considering the needs of the 21st century.

The five-story building with a roof area of 209 m<sup>2</sup> receives an average of 140.6 m<sup>3</sup> of rain annually. In the case of a conventional roof, 126.5 m<sup>3</sup> of water can be collected with a runoff coefficient ( $\psi$ ) of 0.9, which means 4.2 m<sup>3</sup> of water per person per year based on the 30 inhabitants of the building. In the case of a green roof, the runoff coefficient can vary widely. Since the experimental building of the University of Pécs, covered with a green roof, is located close to this area, we calculated a value of 0.5 measured there. This means that the green roof evaporates 70.3 m<sup>3</sup> of water into its surroundings, making the microclimate more pleasant, and 70.3 m<sup>3</sup> of water can be collected, which means 2.3 m<sup>3</sup> per person.

The ten-story building has a volume of 135.9 m<sup>3</sup> of rain on its 202 m<sup>2</sup> surface. 122.3 m<sup>3</sup> (2 m<sup>3</sup> per inhabitant) can be collected for traditional roof and 68 m<sup>3</sup> (1.1 m<sup>3</sup> per inhabitant) for green roof (Table 1.).

A biosolar rooftop system, which integrates solar panels with a roof partially or fully covered in vegetation, significantly enhances panel efficiency and energy production. A research team from the Netherlands' KWR Water Research Institute found that blue-green roofs can cool rooftop PV systems, reducing surface temperatures by up to 4.64°C compared to conventional bitumen roofs [9]. Moreover, according to other case studies, plant growth was quickest and healthiest in the zones directly surrounding the solar panels, with several species doubling in coverage [10].

**Table 1.** Annual collected rainwater volume

Building type	Number of flats	Number of inhabitants	Roof area (m <sup>2</sup> )	Annual average rain volume V (m <sup>3</sup> )	Traditional roof ( $\psi=0.9$ ) collected rainwater volume $V_T$ (m <sup>3</sup> )	Traditional collected rainwater per inhabitant (m <sup>3</sup> /person)	Green roof ( $\psi=0.5$ ) collected rainwater volume $V_G$ (m <sup>3</sup> )	Green collected rainwater per inhabitant (m <sup>3</sup> /person)
Five-story	15	30	209	140.6	126.5	4.2	70.3	2.3
Ten-story	31	62	202	135.9	122.3	2.0	68.0	1.1

When biosolar roofs are used, usually one-third of the roofs are covered by solar panels, so the size of the vegetation-covered surface changes, which affects the runoff factor. At the same time, this type of roof has significant advantages in generating energy, improving cooling and improving air quality. The efficiency of energy production can facilitate the installation of electric charging stations, further maximizing its usefulness and environmental impact.

Nowadays, choosing between a green roof and solar panels is no longer necessary. The Sika Switzerland AG and its partner Centroplan GmbH from Germany have developed a solution for this. The basis for this is a photovoltaic mounting system specially designed for flat membrane roofs, the so-called Sika SolarMount-1 (SSM1) system. The Sika system uses a fundamentally different technique of fixing the PV generator to the roofing membrane. Sika uses precisely fitting moulded parts, the so-called Solar Click [11]. This connector to the roofing membrane is made of the same material as the roofing membrane (PVC or FPO). Experience shows that the runoff coefficient of such an integrated green roof and solar PV system provides a runoff factor of  $\psi=0.5$ , i.e. we can get the results obtained for a simple green roof.

#### 2.4. Stormwater tank and greywater system

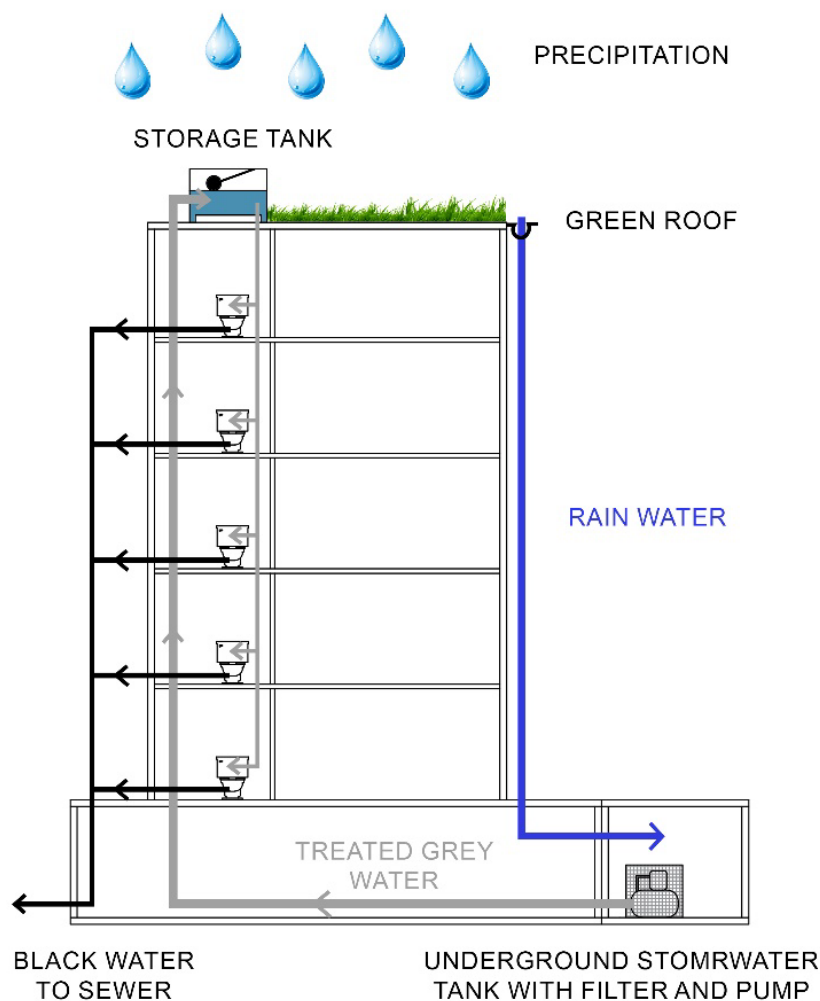
Because climate change is expected to result in less frequent but more intense and short-lived rainfall, the considered precipitation is indicated with a frequency of 1% (100-year return period) and a duration of 10 minutes in the calculations. For our calculation, we used the rational method -  $Q = \psi \cdot A \cdot I$  - where  $Q$  is the runoff discharge in m<sup>3</sup>/sec,  $\psi$  is the runoff coefficient of the roof,  $A$  is the catchment area calculated from the roof in m<sup>2</sup>,  $I$  is the intensity of precipitation with a frequency of 1%, which is 158.49 mm/hr = 439.24 l/sec, hectare in Pécs-Árpádtető [7].

We have prepared our calculations for both five- and ten-story buildings for traditional and green roofs. As before, we worked with a runoff coefficient of 0.9 for traditional and 0.5 for green roofs. In the case of high-intensity rainfall lasting 10 minutes that returns once in 100 years, 4.98 m<sup>3</sup> and 4.74 m<sup>3</sup> of rainwater can be collected from the traditional roof, and 2.76 m<sup>3</sup> and 2.64 m<sup>3</sup> from the green roof. If we think about individual solutions for buildings, we can solve the task with a relatively small volume of 3-5 m<sup>3</sup> stormwater tanks (Table 2.). Once the stormwater tank is constructed, the only routine maintenance required is an annual

inspection and filter cleaning, with the holding tank cleaned every decade. The water pump and attached pressure tank distributing the rainwater would also be replaced after ten years. After filter treatment, the rainwater collected in the stormwater tank is returned to consumers through greywater pipes. Consumers can reuse it for toilet flushing, and it is discharged into the sewer system after use (See Figure 3.).

**Table 2.** Runoff discharge from rainfall 100-year return period and 10 minutes duration

Building type	A (m <sup>2</sup> )	I (mm/hr)	Traditional roof $\psi_1$	$Q_T$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_T$ (m <sup>3</sup> /10 min)	Green roof $\psi_2$	$Q_G$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_G$ (m <sup>3</sup> /10min)
Five-story	209	158.49	0.9	0.0083	<b>4.98</b>	0.5	0.0046	<b>2.76</b>
Ten-story	202	158.49	0.9	0.0079	<b>4.74</b>	0.5	0.0044	<b>2.64</b>



**Figure 3.** Rainwater collection and reuse in multi-story prefabricated building

The prefabricated concrete buildings were built 40-45 years ago and have yet to undergo mechanical renovation. In the case of prefabricated buildings, the water blocks are located one below the other. Therefore, the construction of a new greywater line can be solved quickly and cost-effectively during the already timely renovation.

People use 100-150 litres of water daily, of which 10-25 litres are used for flushing the toilet. Assuming that new, water-saving toilets will be installed during the renovation, we calculated 15 litres of water per person per day. Using our previous calculation (Table 1), residents can flush the toilet from the collected rainwater for 280 days in the case of five-story buildings using the traditional roof and for 153 days in the case of green roofs. The same for ten-story buildings would be 133 days and 73 days. This means that 20-76% of the year it is not necessary to use piped drinking water to flush toilets.

### 3. Results and discussions

In this research it was conducted in an area built up with prefabricated concrete buildings close to the city centre of Pécs. The area of the research is approximately 5 hectares. In addition to the twelve five-story and seven ten-story buildings, several other public institutions are in the area. However, their impact on urban water management was not anticipated.

According to our results, by collecting rainwater, 1319.6-2374.1 m<sup>3</sup> of municipal drinking water can be replaced annually, depending on the type of roofs on which the collection occurs. The nearly 800 inhabitants can thus use rainwater for toilet flushing 20-76% of the year. Collecting rainwater also helps avoid flash floods. According to our calculations, the area and the deeper parts of the city can be relieved of damage from up to 51.6-92.9 m<sup>3</sup> of rainfall if the system is built (Table 3.).

**Table 3. Amount of rainwater that can be collected from the research area**

Part	Building type	Number of buildings	Number of flats	Number of inhabitants	Traditional roof annual collected water volume $V_T$ (m <sup>3</sup> )	Green roof annual collected water volume $V_G$ (m <sup>3</sup> )	Traditional roof $Q_T$ (m <sup>3</sup> /10perc)	Green roof $Q_G$ (m <sup>3</sup> /10perc)
A	Five-story	5	75	150	632.5	351.5	24.9	13.8
	Ten-story	3	93	186	366.9	204.0	14.2	7.9
B	Five-story	7	105	210	885.5	492.1	34.9	19.3
	Ten-story	4	124	248	489.2	272.0	19.0	10.6
<b>Total</b>		<b>19</b>	<b>397</b>	<b>794</b>	<b>2374.1</b>	<b>1319.6</b>	<b>92.9</b>	<b>51.6</b>

#### 4. Conclusions

Stormwater management can be a problem, especially in urban locations. This research sought to answer how integrated water management can be implemented while renovating prefabricated concrete buildings. The goal was to develop a unique solution proposal for renovating the buildings sustainably. In the case of roofs, it was shown how the amount of stormwater that can be collected is affected if a traditional roof, green roof or solar roof is made during the renovation. The type of roof affects the runoff coefficient, so it affects how much water can be retained on the roof, thereby increasing evaporation and reducing runoff. Given the original goal, we prefer a green or solar roof.

Regardless of the type of roof, rainwater collection is an essential part of stormwater management. The calculation shows that large volumes of cisterns are not required for these buildings to collect high-intensity, short-term rainfall, thus eliminating the risk of flash flooding. Since relatively small-volume rainwater tanks can collect rainfall per roof, it may be worth considering building standard tanks for two or three buildings.

Rainwater collection is essential not only to delay runoff but also to reuse it as greywater. In the case of prefabricated buildings, the water blocks are located one below the other; therefore, the construction of a new greywater line can be solved easily and cost-effectively. According to our calculations, on average, grey water of this origin may be available for toilet flushing in half of the year.

#### 5. References

- [1] Ye-Shaung Xu et al.: Design of sponge city: Lessons learnt from an ancient drainage system in Ganzhou, China. *Journal of Hydrology* Vol:563; pp 900-908. China, 2018. (ISSN: 0022-1694)
- [2] Xiaoshu Hou et al.: Is the sponge city construction sufficiently adaptable for the future stormwater management under climate change? *Journal of Hydrology* Vol:588; Article125055. China, 2020. (ISSN: 0022-1694)
- [3] Qian Li et al.: Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China. *Journal of Environmental Management* Vol:231; pp10-20. China, 2019. (ISSN: 0301-4797)
- [4] Szabó József et al.: Természeti veszélyek. In Kocsik K. (főszerk.) *Magyarország Nemzeti Atlasza – Természeti környezet*. Budapest, 2018. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet pp. 156-167. (ISBN: 978-963-9545-56-4)
- [5] Wen Liu et al.: Cost-effectiveness analysis of extensive green roofs for urban stormwater control in response to future climate change scenarios. *Science of the Total Environment* Vol:856, Article 159127. China, 2023. (ISSN: 0048-9697)
- [6] Florence Rezende Leite, Maria Lúcia Pereira Antunes: Green roof recent designs to runoff control: A review of building materials and plant species used in studies. *Ecological Engineering* Vol:189, p:106924. Brazil, 2023. (ISSN: 0925-8574)

- [7] HungaroMet Magyar Meteorológia Szolgálat Nonprofit Zrt. [Online]  
[https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag\\_eghajlata/varosok\\_jellemzoi/Pecs/](https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/varosok_jellemzoi/Pecs/).  
Accessed: 20 March, 2024.
- [8] Bihari Zita et al.: Éghajlat. In Kocsik K. (főszerk.) *Magyarország Nemzeti Atlasza – Természeti környezet*. Budapest, 2018. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet pp. 58-69. (ISBN: 978-963-9545-56-4)
- [9] Study shows biosolar rooftop system benefits power output, August 2023. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2023/08/21/study-shows-biosolar-rooftop-system-benefits-power-output/>. Accessed: 20 March, 2024.
- [10] Irga, Peter et al.: A green roof or rooftop solar? You can combine them in a biosolar roof, boosting both biodiversity and power output. *The Conversation*. UK, 2023. [Online]. <https://theconversation.com/a-green-roof-or-rooftop-solar-you-can-combine-them-in-a-biosolar-roof-boosting-both-biodiversity-and-power-output-211347>. Accessed: 20 March, 2024.
- [11] Laumen, Robert: The battle for surface area. *Living Architecture Monitor a Green Roofs for Healthy Cities Publication*. 2022. [Online] <https://livingarchitecturemonitor.com/articles/the-battle-for-surface-area-sika-w22>  
Accessed: 20 March, 2024.



## Proračun promjene polažaja savijanja *Calculation of bending position change*

B. Grizelj<sup>1,\*</sup>, M. Duspara<sup>1</sup>, M. Stoić<sup>1</sup>, V. Starčević<sup>1</sup>, M. Kokorić<sup>1</sup>, S. Kokorić<sup>1</sup>, M. Čuletić Čondrić<sup>1</sup>, K. Vuletić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište Slavonski Brod, Slavonski Brod, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: bgrizelj@unisb.hr

### Sažetak

U radu su prikazane temeljne teorije procesa savijanja koje su ključne za određivanje stanja naprezanja i deformacija u materijalu, kao i za proračun momenta savijanja, sile savijanja i stupnja elastičnog povrata.

Ako debljina lima ostaje konstanta, može se proračunati pomak slojeva u poprečnom presjeku i njihova promjena oblika.

Pod pretpostavkom, konstantnosti debljine lima (a time je srednji sloj uvijek neistegnuti sloj, što je ispunjeno kod simetrične raspodjele naprezanja u poprečnom presjeku), može se izračunati pomicanje slojeva u poprečnom presjeku, i njihova deformacija. To je potrebno radi određivanja što točnijeg naprezanja, momenta, sile i elastičnog povrata.

**Ključne riječi:** proračun, sloj, savijanje

### Abstract

The paper presents fundamental theories of the bending process, which are crucial for determining the stress-strain state in the material, as well as for calculating the bending moment, bending force, and the extent of elastic recovery.

If the thickness of the sheet remains constant, the displacement of the layers in the cross section and their change in shape can be calculated.

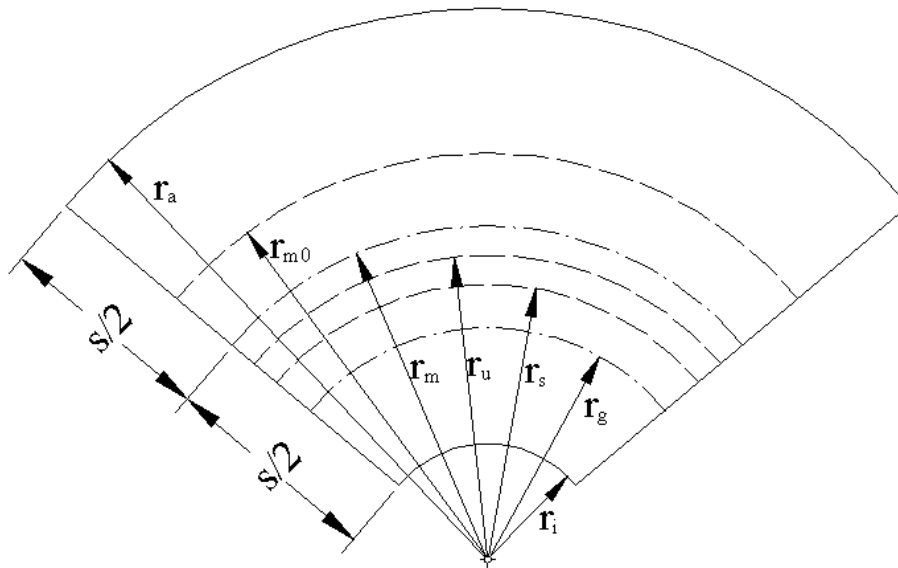
Under the assumption of constancy of the thickness of the sheet (and thus the middle layer is always an unstretched layer, which is fulfilled in the case of symmetrical stress distribution in the cross section), the displacement of the layers in the cross section, and their deformation, can be calculated. This is necessary in order to determine the most accurate stress, moment, force and elastic return.

**Key words:** calculation, layer, bending

### 1. Introduction

The assumption of a constant, neutral layer in the middle of the bent sheet turned out to be incorrect at large deformations. When bending, the following layers are therefore distinguished Figure 1 [1] :





**Figure 1.** Layers when bending [1]

outer edge layer of  $r_a$

- the original middle layer  $r_{m0}$
- middle layer  $r_m$
- unstretched layer of  $r_u$
- stress-free layer  $r_s$
- layer at the limit of deformation (zero-layer)  $r_g$
- inner marginal layer  $r_i$

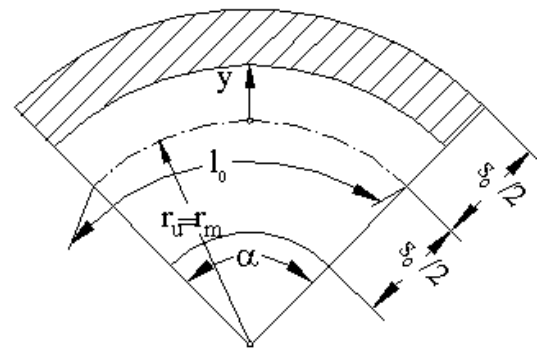
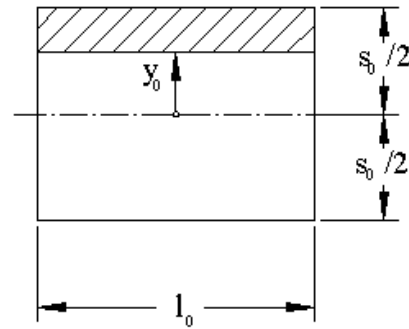
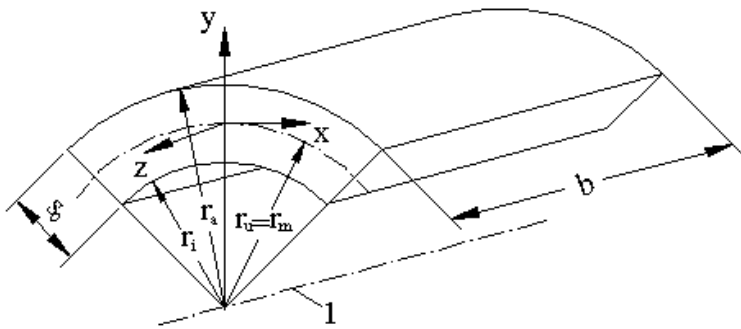
All layers from  $r_a$  to  $r_{m0}$  stretch freely during bending; those between  $r_{m0}$  and  $r_u$  are first compressed and then stretched even more than they were compressed before; with  $r_u$ , the magnitudes of stretching and compression are equal; the layers between  $r_u$  and  $r_g$  are first compressed and then stretch less than they were compressed before; at  $r_g$ , compression is just ending, stretching has not yet occurred; between  $r_g$  and  $r_i$  the layers are freely compressed.

## 2. Elementary theory

Under the assumption of constancy of sheet thickness (and thus the middle layer is always an unstretched layer, which is fulfilled in the case of symmetrical stress distribution in the cross section), the movement of the layers in the cross section and their deformation can be calculated. If a part of the material, i.e. the layer before bending, has a distance  $y_0$  from the middle layer, then according to [2] and Fig. 2 [2] from the constancy of the volume before and after bending, it follows:

Where is it:

$r$	mm	radius
$b$	mm	width bending
$\varepsilon$		strain
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	stress
$s$	mm	material thickness



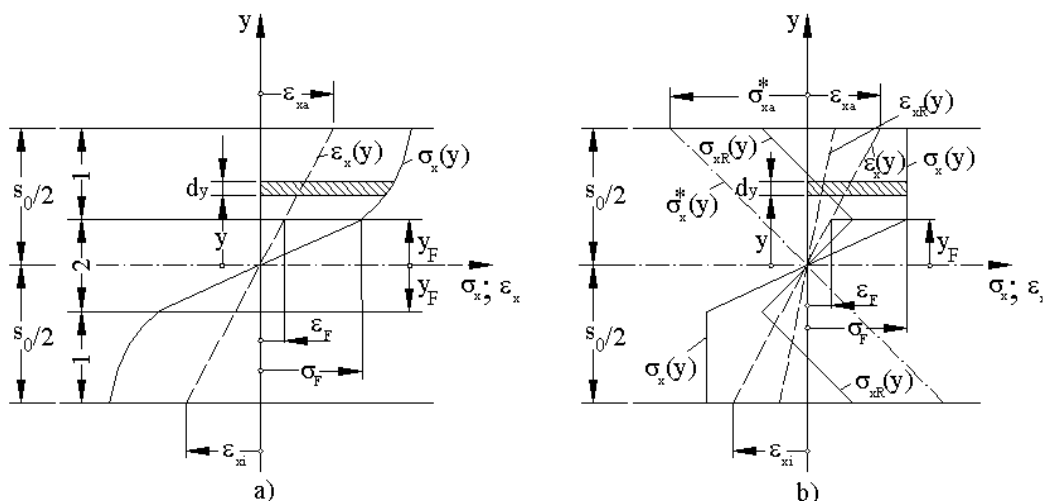


Figure 2. Markings on the sheet metal [2]

$$dx \left( \frac{s_0}{2} - y_0 \right) = \frac{dx \cdot (1 + \epsilon_{xa}) \cdot \left( r_m + \frac{s_0}{2} \right)}{2} - \frac{dx \cdot (1 + \epsilon_x) \cdot (r_m + y)}{2} \quad (1)$$

If the values (1) are included in the expression

$$y = \frac{s_0}{2 \cdot \epsilon_{xa}} \cdot \epsilon_x \quad \text{and} \quad (2)$$

$$r_m = \frac{s_0}{2 \cdot \epsilon_{xa}} \quad , \quad (3)$$

follows after sorting

$$\epsilon_x = -1 + \sqrt{\epsilon_{xa}^2 + 4\epsilon_{xa} \cdot \frac{y_0}{s_0} + 1} \quad , \quad (4)$$

respectively

$$y = \frac{s_0}{2\epsilon_{xa}} \cdot \left( -1 + \sqrt{\epsilon_{xa}^2 + 4\epsilon_{xa} \cdot \frac{y_0}{s_0} + 1} \right) \quad (5)$$

The expression (5) gives the position of that layer after bending, which was at a distance  $y_0$  from the middle layer before bending. The size of the shift is  $(y - y_0)$ .

Assuming that the thickness of the sheet  $s_o$  is constant and hence that  $\varepsilon_{xa} = \varepsilon_{xi}$  (thus the middle layer is always an unstretched layer) using the expressions (4 and 5) follows:

1. the original middle layer ( $y_m, \varepsilon_m, \sigma_m$ ), i.e. the layer that lay before bending in the middle of the cross-section by putting  $y_o = 0$  in the expression (4 and 5):

$$\varepsilon_m = -1 + \sqrt{\varepsilon_{xa}^2 + 1} \quad (6)$$

$$y_m = \frac{s_o}{2 \cdot \varepsilon_{xa}} \cdot \left( -1 + \sqrt{\varepsilon_{xa}^2 + 1} \right)$$

2. The expression (4)  $\varepsilon_x = f(\varepsilon_{xa})$  is a set of hyperbolas with parameter  $\frac{y_o}{s_o}$ , and their vertex lies where the first derivative of the curve with respect to  $\varepsilon_{xa}$  jednaka is equal to zero. Using the above follows:

$$\frac{d\varepsilon_x}{d\varepsilon_{xa}} = 0 = \frac{\varepsilon_{xa} + 2 \frac{y_o}{s_o}}{\sqrt{\varepsilon_{xa}^2 + 4\varepsilon_{xa} \cdot \frac{y_o}{s_o} + 1}}, \quad (7)$$

from which it follows that it is

$$\varepsilon_{xa} = -2 \cdot \frac{y_o}{s_o}. \quad (8)$$

(since the denominator cannot be zero).

By inserting expression (8) into expression (4) it follows

$$\varepsilon_g = -1 + \sqrt{1 - \varepsilon_{xa}^2}. \quad (9)$$

Expression (9) is the equation of a circle with radius 1, whose center lies at  $\varepsilon_x = -1$  and  $\varepsilon_{xa}=0$ .

The ordinate for the layer at the deformation limit is

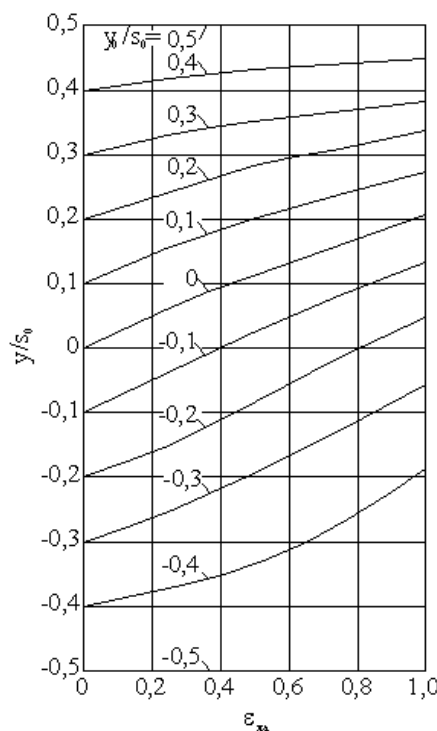
$$y_g = r_m \cdot \left( -1 + \sqrt{1 - \varepsilon_{xa}^2} \right), \quad (10)$$

or

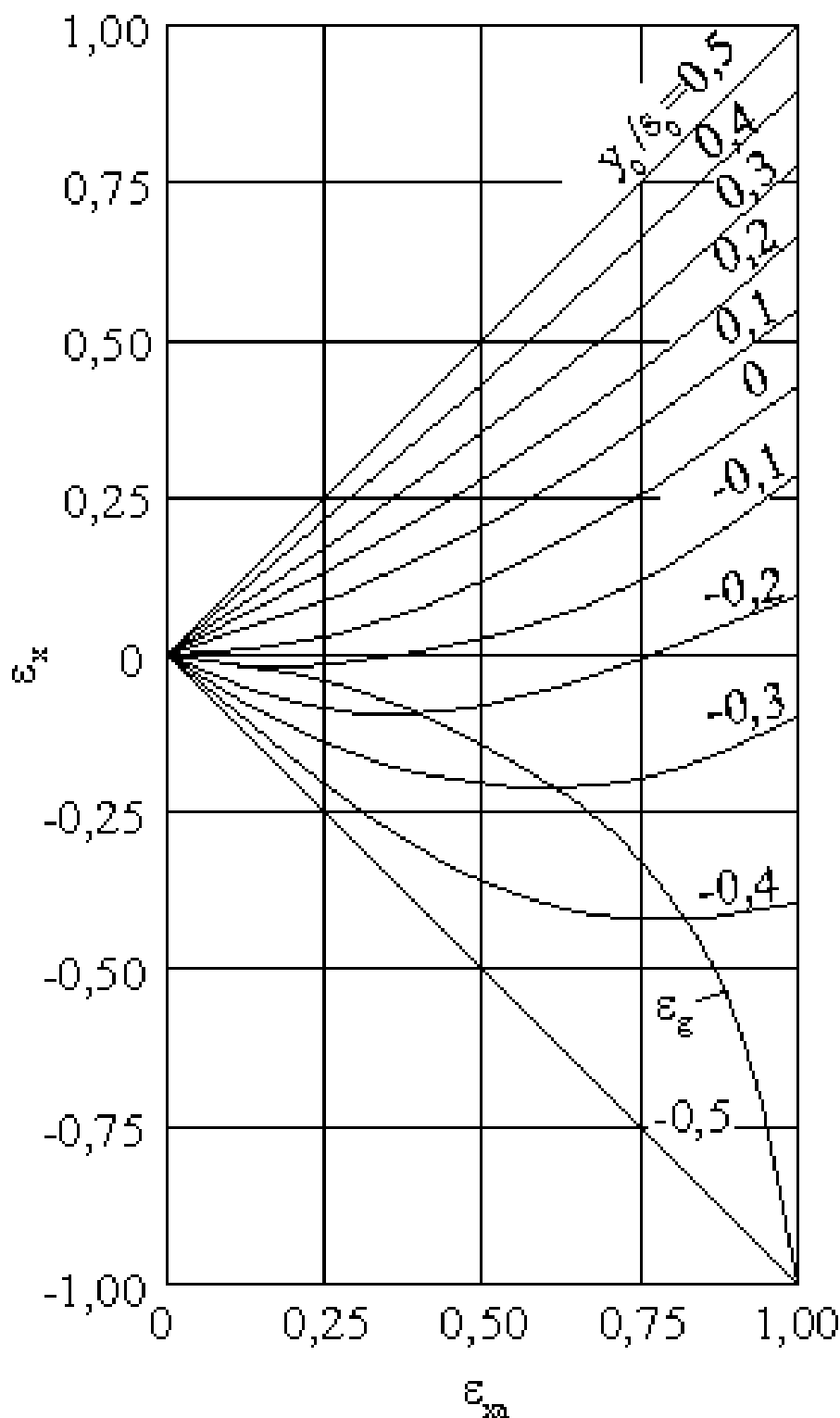
$$y_g = \frac{s_o}{2 \cdot \varepsilon_{xa}} \left( -1 + \sqrt{1 - \varepsilon_{xa}^2} \right). \quad (11)$$

By using the expression (9, 10 and 11), the layer at the limit of deformation was determined  $(y_g, \varepsilon_g, \sigma_g)$ .

Fig. 3 [3-4] shows the movement of individual layers in a cross section, and Fig. 4 [3-4] shows the deformation of individual layers, depending on the edge deformation.



**Figure 3.** Movement of individual layers in the cross-section depending on the edge deformation [3-4]



**Figure 4.** Deformation of individual layers depending on edge deformation [3-4]



Figure 4 shows how the layers on the compression side are  $\left(\frac{y_o}{s_o} < 0\right)$  first compressed, and then, depending on the size of  $\varepsilon_{xa}$ , they are elongated again. Analyzing Figure 4, it can be seen that at the beginning of bending (at small edge deformations) the zero-layer coincides with the unstretched layer, and at larger curvatures there is a significant deviation. If the zero-layer does not coincide with the middle layer, the assumed symmetrical stress distribution cannot be correct, if the thickness of the sheet is constant.

### 3. Extension of elementary theory

Wolter [5] and Schwark [6] extend the calculations in the framework of the research to plane bending. At that Wolter, corrects on the basis of approximate solutions Ludwik [4] assumptions about the constancy of the thickness of the sheet, which is calculated using the expression

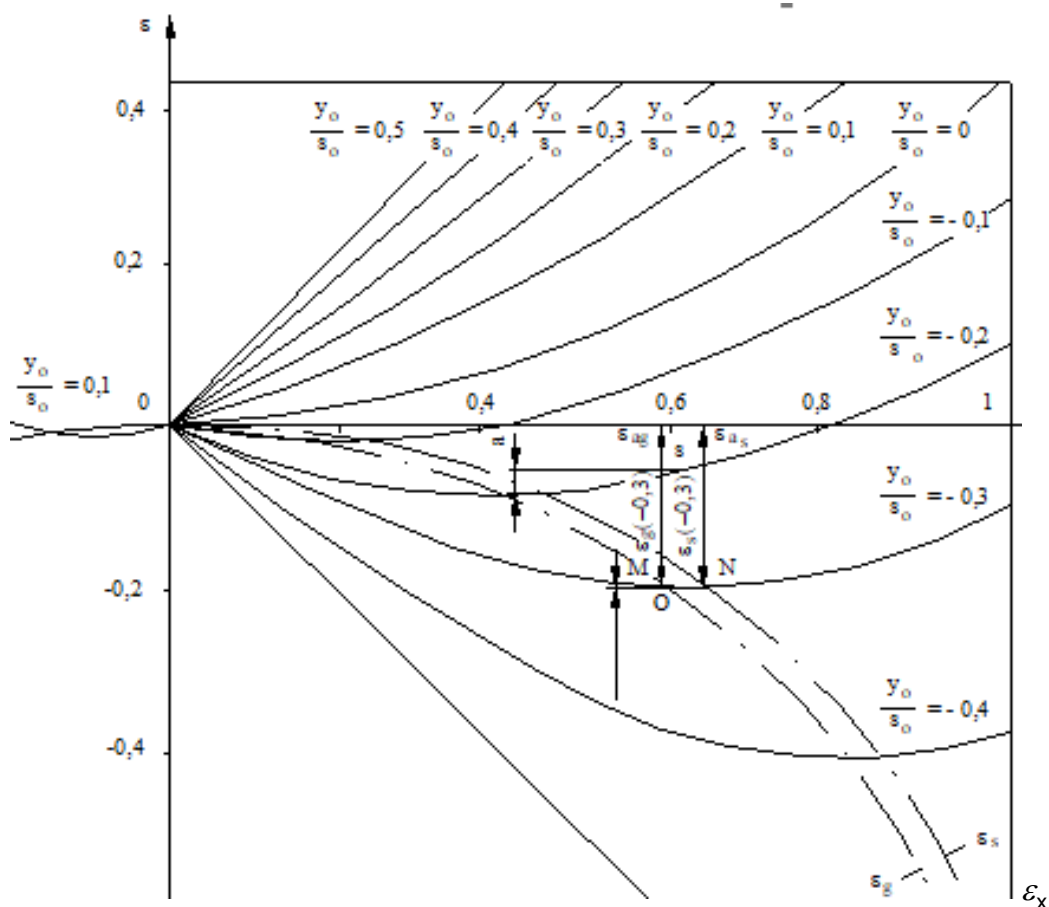
$$s = \frac{s_o}{1 + \frac{|\varepsilon_{xa}| - |\varepsilon_{xi}|}{2}} \quad (12)$$

Still Wolter and Schwark retain the uniaxial state of stress in further analysis.

Schwark continues research Wolter and determines the elastic return. He proves that the layers at the limit of deformation should be distinguished  $(r_g, y_g, \varepsilon_g, \sigma_g)$  of which the hyperbolic deformation flow reaches the crown point (also called zero-layer), and the stress-free layer  $(r_s, y_s, \varepsilon_s, \sigma = 0)$ . The amount of deformation of the stress-free layer according to [1-4] is

$$\varepsilon_s = \sqrt{1 - \varepsilon_{ag}^2} - 1 - \frac{\sigma_g}{E} \quad (13)$$

where is  $\varepsilon_{ag}$  abscissa size for some size  $\varepsilon_g$ , fig.5 [3].



**Figure 5.** Determining the deformation of the layer in which the stresses have disappeared  $\varepsilon = f(\varepsilon_x)$  [3]

The picture shows the change  $\varepsilon = f(\varepsilon_x)$  for different values  $y_o/s_o$ .

The magnitude of the abscissa  $\varepsilon_{as}$  for  $\varepsilon_s$  according to [1-4] is calculated with the expression

$$\varepsilon_{as} = \varepsilon_{ag} + \frac{\sigma_g}{E} \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{E}{\sigma_g} \sqrt{1 - \varepsilon_{ag}^2}} \quad (14)$$

Ordinate  $y_s$  to determine the curvature of the stress-free layer is

$$y_s = \frac{s_o}{2 \cdot \varepsilon_{ag}} \cdot \varepsilon_s \quad (15)$$



#### 4. Bending moment

The bending moment is determined according to [1-3] expression

$$M/b = \int_{y_i}^{y_g} \sigma_{ekv} \cdot y dy + \sigma_g \frac{2}{3} (y_g - y_s) \left[ y_g - \frac{2}{5} (y_g - y_s) \right] + \sigma_m \frac{2}{3} (y_m - y_s) \left[ y_m - \frac{2}{5} (y_m - y_s) \right] + \int_{y_m}^{y_a} \sigma_{ekv} \cdot y dy$$

(16).

Where is it:

$k_f (\sigma_{ekv}, \sigma')$  N/mm<sup>2</sup> flow stress

$b$  mm width bending

The bending moment is the basis for the calculation of force and elastic recovery.

#### 5. Conclusions

The paper provides a calculation of the change in bending position. This is important for determining the stress in the material as accurately as possible. In this way, the bending moment, the bending force and the size of the elastic recovery can be calculated.

In order to calculate the same, different theories were used.

#### 6. References

- [1] Grizelj, Branko. Oblikovanje metala deformiranjem. . Slavonski Brod : Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu . (2002). (ISBN 953-6048-21-3) **(book)**
- [2] Grizelj, Branko. Oblikovanje metala deformiranjem Umformtechnik Metal forming. Slavonski Brod : Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu (2018). (ISBN 978-953-6408-88-5) **(book)**
- [3] Lange, Kurt. Umformtechnik (1-4). Spring-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo (1984-1993) **(books)**
- [4] Ludwik, P. Technologische Studie über Blechbiegung, Technische Blätter, Prag 1903, s.133-159.
- [5] Wolter, K.H. Bildsames Biegen von Blechen um gerade Kanten. Dissertation, Technische Hochschule Hannover, 1950.
- [6] Schwark, H.F. Rückfederung an bildsam gebogenen Blechen. Dissertation, Technische Hochschule, Hannover, 1952.
- [7] Grizelj, Branko. Determination of Flow curves (unpublished work) (2022).



## Primjena proširena stvarnosti u 3D oblikovanju *Augmented reality as part of 3D design*

S. Švooger<sup>1\*</sup>, A. Čikić<sup>1</sup>, Z. Busija<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište Sjever, 104. Brigade 3, 42000 Varaždin, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [sinisa.svooger@unin.hr](mailto:sinisa.svooger@unin.hr)

### Sažetak

Opisana je tehnologija proširene stvarnosti (AR) u sklopu podjele imerzivnih tehnologija (*immersive technology*). Za prikaz proširene stvarnosti korišten je eDrawings – 3D MCAD preglednik. To je program namijenjen za pametne uređaje (*smartphone*) - mobitele, pogonjene Android operacijskim sustavom. Ukratko je opisana i usporedba proširene stvarnosti s ostalim imerzivnim tehnologijama – virtualnom stvarnosti (VR) i mješovitom stvarnosti (MR). Opisana je i podjela - korištenje AR tehnologije pomoću pametnih telefona, naglavnih zaslona i naočala. Za prikaz korištenja proširene stvarnosti korišteni su 3D modeli i sklopovi izrađeni s pomoću 3D MCAD (*mechanical computer-aided design*) SolidWorks programa koji je kompatibilan sa eDrawing 3D MCAD preglednikom. Opisane su prednosti i nedostaci korištenja programskih alata za prikaz proširene stvarnosti u postprocesu (pregled, prezentacija i validacija) 3D oblikovanja i kreiranja 3D modela.

**Ključne riječi:** Proširena stvarnost, Imerzivne tehnologije, eDrawing, SolidWorks, 3D MCAD, Android, 3D oblikovanje, 3D model

### Abstract

Augmented reality (AR) technology is described as part of the immersive technologies. The eDrawings CAD viewer program intended for smart devices (smartphones) powered by the Android operating system was used to display augmented reality (AR). A comparison of augmented reality with other immersive technologies – virtual reality (VR) and mixed reality (MR) is also briefly described. There are also description of AR technology using smartphones, AR headsets and smart glasses. To demonstrate the use of augmented reality, 3D models and assemblies created using the 3D MCAD (mechanical computer-aided design) SolidWorks program were used. The advantages and disadvantages of using augmented reality tools in the 3D postprocess design (review, validation and presentation) are described.

**Key words:** Augmented reality, Immersive technologies, eDrawing, SolidWorks, 3D MCAD, Android, 3D desing, 3D model

## 1. Uvod

3D oblikovanje (modeliranje) je kreiranje trodimenzionalnih predmeta na vrlo precizna način, uz pomoć kompleksnih softvera (programa). Ono što nastane naziva se 3D modelom, a više modela čini 3D sklop. 3D oblikovanje se sastoji od nekoliko procesa (faza): pripremni proces, proces 3D oblikovanja i postprocesna faza 3D oblikovanja. U pripremnom procesu izrađuju se skice dizajna koji se kasnije u procesu 3D oblikovanja modelira te izrađuje proizvodna dokumentacija. U postprocesnoj fazi 3D oblikovanja 3D modeli i sklopovi prolaze pregled, prezentaciju i validaciju dizajna. Navedeni postproces 3D oblikovanje je bitan jer pomoću imerzivnih tehnologija dodaje 3D modelu i 3D sklopu potrebnu realnost prikaza. Unatrag 26 godina milijuni ljudi bili su nesvjesno izloženi jednoj od imerzivnih tehnologija, proširenoj stvarnosti (*Augmented reality - AR*). 1998 tvrtka Sportvision predstavila je na stvarnom nogometnom terenu digitalnu informaciju u obliku žute linije koja poboljšava korisničko iskustvo gledanja televizijskog prijenosa američkog nogometa (slika 1).

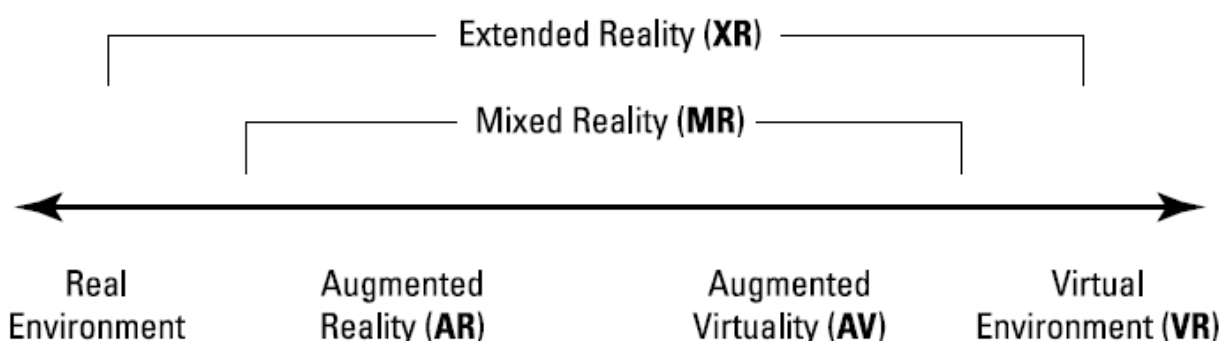


**Slika 1.** Prikaz žute linije na televizijskom ekranu [1]

Povlačenje linije na ekranu je komplicirano. Kad bi se linija jednostavno postavila na videosadržaj, svaki put kada bi igrač, sudac ili lopta prešli preko mjesta bili bi prekriveni linijom. Kako bi se digitalna linija prikazala ispod raznih ljudi i predmeta, softver koristi jednu paletu boja za boje koje bi se trebale pojaviti kao dio polja i druga paleta boja za boje koje bi se trebale pojaviti kao linija. Kada se nacrtava digitalna linija na video sliku, boje palete boja polja se pretvaraju u žuto gdje bi se linija trebala pojaviti, dok se boje u drugoj paleti boja ne pretvaraju, navodeći ljude i predmete da se pojave na vrhu digitalne linije [2]. Ovo je samo jedan od primjera svakodnevnog nesvjesnog korištenja i upotreba imerzivnih tehnologija koje će u budućnosti biti jedna od ključnih tehnologija u razvoju društva.

## 2. Imerzivne tehnologije

Zbog brzog napretka tehnologije terminologija nazivlja koristi se tako da ponekad nije usklađena s nazivljem u ostatku industrije. S vremenom se terminologija mijenja i prvi nazivi koji su definirani u početku pojave tehnologije više nisu adekvatni. Ponekad i firme koje se bave proizvodnjom i razvojem tehnologija brendiraju nazive ili dodaju svoje vlastite. Imerzivne tehnologije su vrlo mlade tehnologije čiji začetak datira početkom 90-ih godina 20. stoljeća s još uvijek nejasnom terminologijom nazivlja - najčešće kod krajnjeg korisnika. Obično tehnologije i terminologija sazre kad postoji adekvatni obrazovni programi koji podučava studente ili učenike o navedenim tehnologijama. Da dolazi do promjena i sazrijevanje tehnologije može poslužiti primjer otvaranja novog studijskog programa u Švicarskoj na HSLU (Lucerne University of Applied Sciences and Arts) za zanimanje Prvostupnik za Imerzivne tehnologije [3]. Naziv imerzija znači „udubiti se u nešto“ pa u tom kontekstu imerzivno se odnosi na: učinak koji virtualni, digitalni svjetovi i simulacije imaju na nas i na našu percepciju stvarnog svijeta koji se sve više smanjuje i poistovjećuje s digitalnom stvorenim svijetom. Na slici 2 prikazan je Milgramov kontinuum stvarnosti (*virtuality continuum*) [4] koji opisuje sve imerzivne tehnologije.



Slika 2. Milgram-ov kontinuum stvarnosti [2]

Kranje lijevo nalazi se stvarna okolina (*Real Environment*) koja se sastoji od stvarnih fizičkih objekata i okoline. Krajne desno nalazi se potpuna suprotnost - virtualna okolina (*Virtual Environment*), koja se sastoji od digitalnih elemenata i okoline. U područje virtualne okoline može se smjestiti virtualna stvarnost (*VR – Virtual Reality*) jer *VR* isključivo prikazuje digitalne elemente u digitalnoj okolini. Između se nalaze proširena stvarnost (*AR – Augmented Reality*) u kojem je prikazana stvarna okolina s digitalnim elementima i proširena virtualnost (*AV – Augmented Virtuality*) je naziv za prikaz digitalne okoline s stvarnim elementima. Miješana stvarnost (*MR – Mixed Reality*) je tehnologija u kojoj korisnik može na ekranu prikazati *AR* ili *VR* tehnologije. Pravi predstavnik koji koristi *MR* tehnologije su *Apple Visio Pro* naočale [5]. Ponekad se *MR* opisuje kao interakcija između digitalnih elemenata s povratnom vezom u stvarnoj okolini a *AR* je interakcija statičkih digitalnih elementa s stvarnom okolinom [6]. Produžena stvarnost (*XR – Extended reality*) je krovni izraz koji obuhvaća sve tehnologije, uključuje *AR*, *MR*, *VR* i ostale buduće tehnologije koje još uvijek nisu razvijene.



### 3. Proširena stvarnost

Proširena stvarnost (*AR - Augmented Reality*) omogućuje prikaz digitalnih elemenata u stvarnoj okolini.

Dugo se *AR* smatrala drugorazrednom tehnologijom u odnosu na *VR*, ali *AR* je u posljednje vrijeme doživjela svojevrsnu renesansu. 2017 Apple i Google su izdali razvojne platforme ARKit [7] i ARCore [8], koje su namijenjene programerima za pisanje *AR* aplikacija.

Ovom objavom znatno se povećao broj *AR*-kompatibilnih uređaja na gotovo pola milijarde uređaja (instalirana baza kompatibilnih iOS i Android uređaja). Neće svaki korisnik na svakom iOS ili Android pametnom uređaju koristiti aplikacije temeljene na *AR*-u, ali oni koji ga žele isprobati više ne moraju kupovati dodatni hardver [2].

#### 3.1 Pametni uređaji - mobiteli

Na najnižem stupnju korištenja *AR* tehnologije nalaze se pametni uređaji (*smartphone*) – mobiteli. Aplikacije kao što su Pokémon Go, Snapchat, Yelp i Instagram, ponudile su jednostavne oblike korištenja *AR* tehnologija. Slika 3 prikazuje Pokémon GO aplikaciju na pametnom uređaju sa stvarnom okolinom i digitalnim elementima prikazanim na ekranu.



**Slika 3.** Pokémon GO aplikacija s prikazom digitalnog elementa (holograma) [9]

Iako je korištenje *AR* tehnologije na pametnim uređajima bilo moguća u prošlosti, izlaskom ARKit-a i ARCore-a programeri su dobili adekvatne razvojne platforme za izradu aplikacija. ARKit-a i ARCore-a imaju sličan skup značajki usredotočen oko pojednostavljivanja digitalnih holograma smještenih u korisničko okruženje a sve sa svrhom da se hologrami učine stvarnijim krajnjem korisniku. Neke značajke: detekcija ravnine za pravilno smještanje objekata u prostoru, detekcija osvjetljenja za oponašanje osvjetljenja na digit. hologramima.

### 3.2 Naglavni zaslon za proširenu stvarnost (*AR headset*)

Pametni uređaji nude najjeftiniji oblik korištenja AR tehnologija. Zbog svog oblika korisnik je dužan stalno držati uređaj i snimati sliku stvarnog svijeta. Uz taj nedostatak trenutni pametni uređaji imaju mali zaslon pa je prikazana stvarna okolina s digitalnim elementima daleko manja od stvarnog vidnog polja korisnika. Naglavni zaslon (*AR headset*) mogu pružiti puno bolje korisničko iskustvo – imerziju. *AR headset*-i imaju oblik manjih kaciga s prozirnim vizikom pričvršćenim sprijeda. Na navedenom viziru prikazuje se slika digitalnih elemenata a najpoznatiji *AR headset*-ovi su Microsoft HoloLens 2 (Slika 4), Meta 2 i Magic Leap 2.



**Slika 4.** Microsoft HoloLens 2 [10]

### 3.3 Naočale za proširenu stvarnost (*AR glasses*)

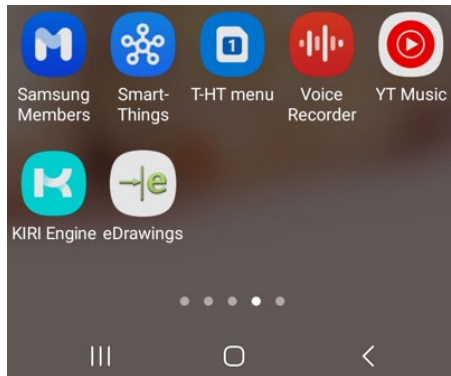
*AR headset*-ovi pružaju najbolje korisničko iskustvo kod korištenja AR-a ali imaju nedostatke u obliku veličine samog *headset*-a i cijene, pa su više namijenjeni za korištenje u istraživanju i razvoju te upotrebu u industriji. U bliskoj budućnosti najbolji način da se koristi AR mogu biti jednostavni uređaji u obliku naočala (poneka se nazivaju i pametne naočale - *Smart Glasses*). Najpoznatije AR naočale su Google Glass (slika 5), kao i mnogi drugi modeli [11].



**Slika 5.** Google Glass [12]

#### 4. eDrawings preglednik

eDrawings je CAD preglednik (*viewer*) za Android pametne uređaje i tablete koji omogućava prikaz eDrawings datoteka i izvornih SolidWorks datoteka (modela, sklopova i crteža). eDrawings je također komunikacijski alat jer omogućava razmjenu informacija o dizajnu proizvoda između razvojnih timova [13]. Uz prikaz modela i sklopova na mobilnim uređajima omogućava korištenje i proširene stvarnosti (*AR*). Na slici 6 nalazi se prečac (*shortcut*) eDrawings preglednika na desktopu pametnog uređaja pogonjenog Android OS-om.



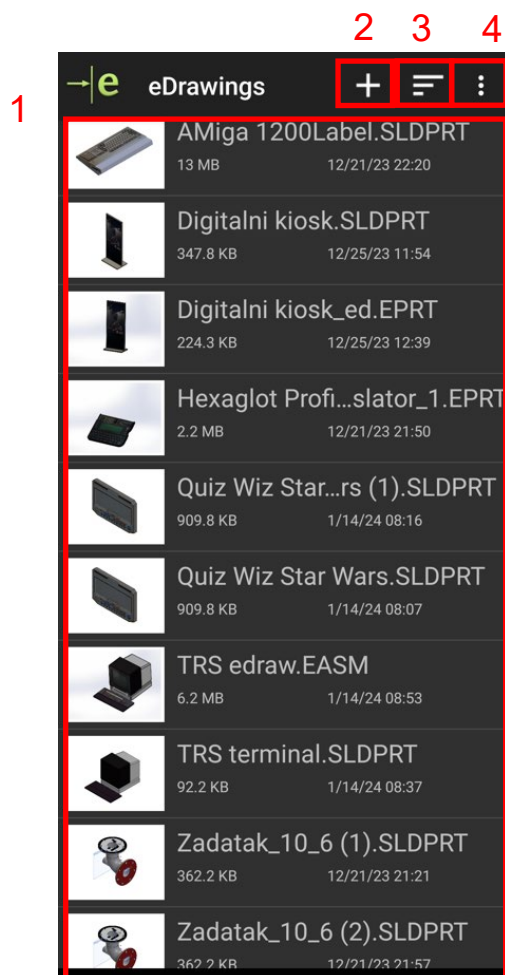
**Slika 6.** Prečac eDrawings preglednika

Preuzimanje je moguće odraditi s Google Play internet trgovine digitalnim programima uz cijenu od 2,26 €. Instalacija i pokretanje programa je jednostavno i zahtjeva operacijski sustav Android 10 i više. Potrebno je napomenuti da postoji verzija eDrawings PRO koja omogućava pregled presjeka 3D modela i mjerenje udaljenosti unutar modela – uz nešto veću cijenu od 10 €. Na slici 7 nalazi se početna slika nakon pokretanja preglednika.



**Slika 7.** Izgled početnog ekrana eDrawings preglednika

Nakon otvaranja preglednika početni izbornik sastoji se od popisa dostupnih modela (1). U postojeći popis moguće je dodati nove modele i sklopove (2) na način da se učitaju iz pametnog uređaja ili *Cloud*-a. Modele je moguće učitati i s WEB ili FTP stranica te s mrežne mape. Potrebno je napomenuti da CAD preglednik podržava 3D datoteke (ekstenzija: EASM, EPRT, SLDASM, SLDPRT, IGES, IGS, JT, STEP, STP, IFC) te 2D datoteke (ekstenzija: EDRW, SLDDRW, DWG, DXF). Sve datoteke u popisu (1) se mogu grupirati (*Sort by...*) (3) prema nazivu (*File name*), ekstenziji (*Extension*), veličini datoteke (*Size*) ili vremenu učitavanja (*Date*). U opcijama pod (4) moguće je izvršiti pregled (*About eDrawings*) instalirane verzije programa te ugovor o korištenju. Moguće je i prijaviti i probleme s programom (*Report a Problem*), preuzeti primjerak 3D modela (*Retrive Samples*), te nadograditi program na Pro verziju (*Upgrade to Pro*). Na slici 8 nabrojani su sastavni dijelovi izbornika (1-4) eDrawings programa.



**Slika 8.** Izgled početnog izbornika eDrawings preglednika (1 – 4)

Nadogradnjom na Pro verziju dobiju se dodatne svojstva u programu: mogućnost mjerenja modela, dinamički pregled presjeka modela u smjerovima osi, stvaranje tekstualnih oznaka i bilješki te dijeljenje datoteka (3D modela) s drugima radi pregleda i daljnjih komentara.



Nakon odabira 3D modela otvara se novi izbornik s odabranim modelom i dodatnim mogućnostima. 3D Model (1) je moguće pomicati i rotirati po površini s jednim prstom. Kombinacijom dva prsta moguće je povećanje ili smanjenje modela. Odabirom na (2) moguća je automatska rotacija modela a pritiskom na (3) slijedi vraćanje modela u početni položaj prije rotacije. (4) opcija je prikaz presjeka koji nije moguće prikazati jer se radi o običnoj ver. programa. Odabirom (5) dolazi do otvaranje novog prozora s izborom prikaza ortogonalnih ili prostornih projekcija odabranog 3D modela.

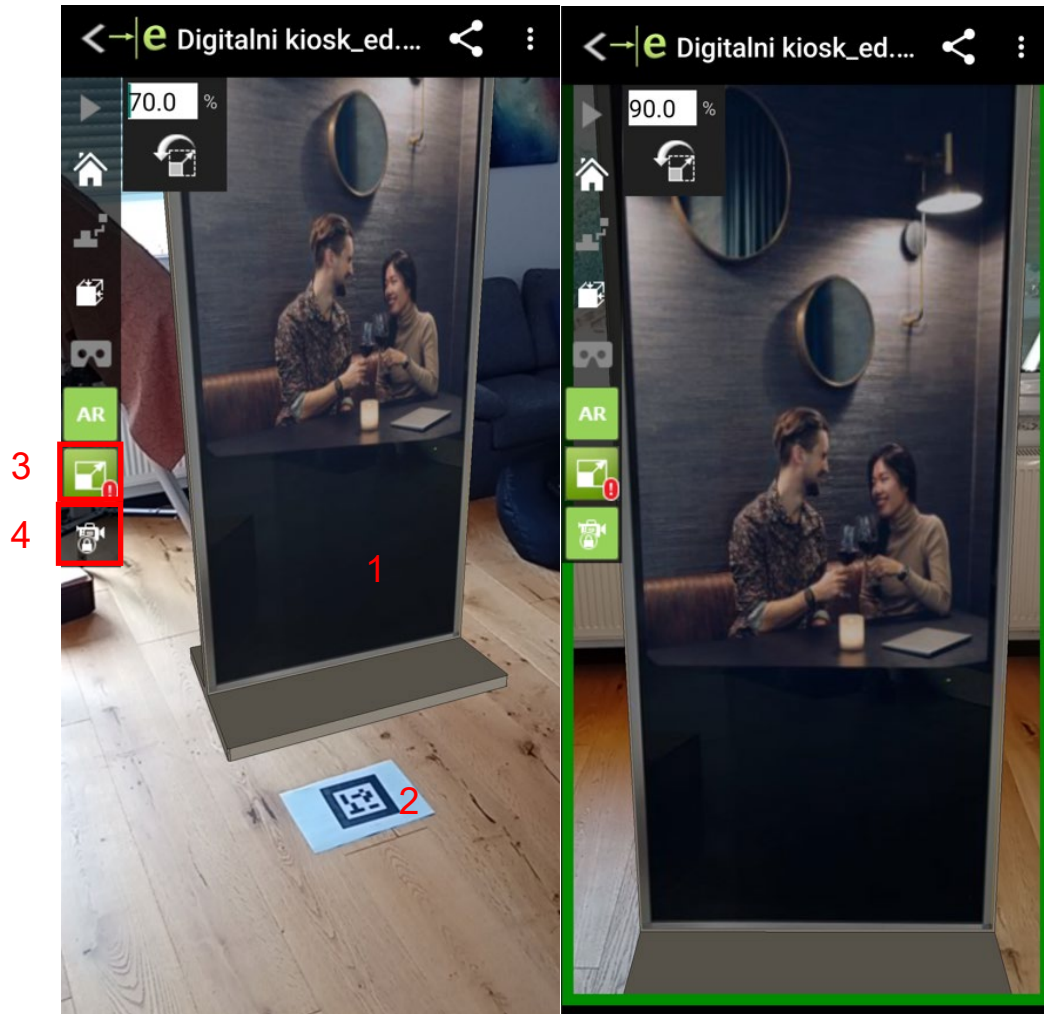
Pod (6) moguće je odabrati prikaz 3D modela u VR tehnologiji korištenjem jednostavnih naočala za pametne uređaje – mobitele. Slika se prikazuje u obliku dva modela za dvije odvojene leće. Na slici 9 prikazan je izbornik nakon otvaranja 3D modela sa svim opcijama.



Slika 9. Izgled izbornika nakon otvaranje 3D modela (1 – 8)

Aktivacijom opcije (7) – prikaz proširene stvarnosti (AR), otvara se novi prozor s dodatnim informacijama (8). Prikazana je poruka da je potrebno izvršiti ispis markera (*Global marker*) u obliku QR koda na list A4 papira. Navedeni marker služi za pozicioniranje 3D modela u prostoru tj. program prepoznaje marker s karakterističnim dimenzija i prema tome formira dimenzije i poziciju 3D modela u prostoru. Za bolje rezultate potrebno je izvršiti kalibraciju (*calibrate*) markera na način da se marker (list papira), postavi u početni položaj u prostoru a nakon toga potrebno je pomoću klizača izvršiti preklapanje digitalne mreže s markerom.

Nakon otvaranje 3D modela, ispisa i kalibracije markera (2) otvara se prozor s pozicioniram 3D modelom (1) u stvarnom prostoru. Moguće je izvršiti rotaciju modela u prostoru kombinacijom dvaju prsta. Od ostalih opcija moguće je izvršiti povećanje ili smanjenje modela u % (3) i fiksaciju modela u prostoru (4). Za 3D model uzet je primjer digitalnog kioska sa stvarnim dimenzijama 1800 mm (visina) x 800 mm (širina). Na slici 10 su prikazane opcije u izborniku AR (3 - 4), te je moguće primijetiti da 3D model većih dimenzija stane u vidno polje pametnog uređaja (Samsung Galaxy A14).



**Slika 10.** Prikaz smanjenog (70% i 90%) 3D modela digitalnog kioska u stvarnom prostoru te dodatnih opcija u izborniku AR (3 – 4)

Galaxy A14 posjeduje ekran veličine oko 167 mm x 72 mm (dijagonala veličine 6,6 inča). Za bolji prikaz većih 3D modela u prostoru potrebno je koristiti tablete veličine dijagonale ekrana od 12,4 inča. CAD preglednik eDrawings u kombinaciji s jeftinim pametnim uređajem omogućuje zadovoljavajući prikaz manjih 3D modela u stvarnom prostoru. Uz kompatibilnost s SolidWorks 3D MCad sustavom eDrawings CAD preglednik ima zadovoljavajuće karakteristike za pregled i korištenje AR tehnologije na mobitelima.

## 5. Zaključak

Kao dio imerzivnih tehnologija, proširena stvarnost (AR) nastavlja se razvijati nevjerojatnom brzinom i čini se da su mogućnosti AR tehnologija neograničene.

Predviđa se da će globalni prihod od AR tehnologija porasti s 10,5 milijardi \$ u 2023. na 21,5 milijardi \$ 2028. [14]. U budućnosti se mogu očekivati hardverski napredniji minijaturni uređaji koji će se neprimjetno integrirati u svakodnevni život: domove, radna mjesta i vanjske prostore. U članku je opisan eDrawings CAD preglednik za pametne uređaje pogonjene Android operativnim sustavom. Navedeni preglednik u kombinaciji s pametnim uređajima služi kao najjeftinija kombinacija za ulaz u svijet AR tehnologije. Uz navedenu prednost navedena kombinacija ima nedostataka u vidu smanjenog vidnog polja korisnika zbog male dimenzije ekrana (6,6"). Ovaj nedostatak može se riješiti korištenjem tableta, uređaja koji imaju veći ekran (12,7"). Dodatne prednosti CAD preglednika su upravo u njegovoj glavnoj funkciji – mogućnosti pregleda 3D modela sklopova i dokumentacije za SolidWorks 3D MCad sustav. Pametni uređaji ne mogu zamijeniti računala pa nisu u mogućnosti prikazati složene sklopove sa stotinama 3D modela. U procesu 3D oblikovanja upotreba pametnih uređaj isključivo je vezana za postprocesnu fazu 3D oblikovanja u koji ulazi pregled, validacija i prezentacija proizvoda. U procesu 3D oblikovanja proizvoda konstruktor ponekad gubi doticaja sa stvarnom fizičkom veličinom 3D modela u prostoru jer projektira u dvije dimenzije (2D). Korištenjem AR tehnologije pomaže u sagledavanju cjelokupnog dizajna i veličine u stvarnom prostoru za koji je 3D model namijenjen. Korištenjem drugih AR tehnologija – naglavnih zaslona, mogući je još realniji prikaz stvarnog modela i to ne samo u postprocesnoj fazi već i za proces 3D konstruiranja omogućujući većem broju ljudi da se upuste u proces 3D oblikovanja čineći tijek rada učinkovitijim.

## 6. Literatura

- [1] <https://illuminate.usc.edu/on-screen-graphics-and-their-impact-on-sports/> 24.7.2024.
- [2] Mealy, Paul. Virtual & Augmented Reality for dummies. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2018. (ISBN 978-1-119-48134-8) (**chapter 1**)
- [3] <https://www.hslu.ch/en/lucerne-school-of-information-technology/degree-programs/bachelor/immersive-technologies/#/> 24.7.2024.
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Reality%E2%80%93continuum> 24.7.2024.
- [5] <https://www.apple.com/apple-vision-pro/> 24.7.2024.
- [6] <https://www.freethink.com/opinion/apple-vision-pro-mr> 24.7.2024.
- [7] <https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit/> 24.7.2024.
- [8] <https://developers.google.com/ar> 24.7.2024.
- [9] <https://niantic.helpshift.com/hc/en/6-pokemon-go/faq/28-catching-pokemon-in-ar-mode-1712012768/> 24.7.2024.
- [10] <https://www.microsoft.com/hr-hr/hololens/buy> 24.7.2024.
- [11] <https://www.pcmag.com/picks/the-best-smart-glasses> 24.7.2024.
- [12] [https://en.wikipedia.org/wiki/Google\\_Glass](https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Glass) . 24.7.2024.
- [13] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.solidworks.eDrawingsAndroid> 24.7.2024.
- [14] <https://artilleryiq.com/reports/headworn-ar-global-revenue-forecast-2023-2028/> 24.7.2024.

## ***Improvements in the textile industry through robotics and automation***

**J. Matijević<sup>1,\*</sup>, I. Brlek<sup>2</sup>, A. Sutlović<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Zagreb university of applied sciences, Zagreb, Croatia

<sup>2</sup>University of Zagreb Faculty of textile technology, Zagreb, Croatia

\* Corresponding Author. E-mail: [iva.brlek@tff.unizg.hr](mailto:iva.brlek@tff.unizg.hr)

### **Abstract**

The textile industry today faces the challenge of simultaneously integrating social, economic and political influences, society, culture, the environment, environmentally friendly technologies and sustainable materials underlining the imperatives of sustainable development and the circular economy replacing the linear economy. In addition, the textile industry is known for its physically and mentally demanding jobs that often expose workers to hazardous chemicals. The aim of this study is to demonstrate the potential advancements through the use of robotics and other modern technologies in the industry, which provide solutions to the previously presented problems. These advancements can not only increase worker safety and satisfaction but also improve the overall efficiency of the industry. The background of this study examines the current solutions being developed and applied to reduce the risks and challenges faced by textile workers. Through comprehensive analyses and case studies, the results demonstrate that the integration of robotics in the textile industry has led to improvements in production processes and working conditions. These advances offer promising potential for further growth and pave the way for a more sustainable and safer future of textile manufacturing. If we look at progress from a sociological, economic and ecological point of view, it is visible in all phases and areas of textile production, from design to the manufacture and processing of textiles, the production of clothing, packaging and even marketing.

**Key words:** robotics, automation, textile industry, industrial efficiency, worker safety

### **1. Introduction**

The textile industry, one of the oldest sectors in the global manufacturing landscape, produces important products worldwide and employs millions of people. Despite its historical importance, the industry today faces challenges that affect its sustainability and operational efficiency. These challenges range from high labour intensity and environmental degradation to safety risks associated with hazardous working conditions [1-3].

The terms “automation” and “robotics” are sometimes used interchangeably, but there are small differences between the two terms. Automation is the process of using technology to perform human tasks. Robotics is the process of developing robots to perform a specific function. Not all types of automation use robots – and not all robots are designed for process automation. Nevertheless, most robots are used for precisely this reason – especially in an industrial context [4].

Recent technological advances, particularly in robotics and automation, offer promising solutions to these long-standing problems. Robotics in the textile industry has the potential to revolutionise manufacturing processes by improving precision, increasing production speed and ensuring worker safety. This integration is in line with the global shift towards sustainable development and more ethical manufacturing practises that take into account both environmental concerns and labour conditions [1,3,5-10].

This paper aims to analyse the role of robotics in the transformation of the textile industry. Based on the existing literature, this study examines the current applications of robotics, discusses their operational and economic impact and considers future trends in the integration of robots. The use of robots in textile production not only serves to mitigate traditional challenges, but also positions the industry at the forefront of innovative, sustainable practises [11].

## 2. History of robotics and automation in textile industry

The application of robotics and automation in the textile industry began over two centuries ago when John Kay invented the flying shuttle. The flying shuttle not only enabled an increase in production, but also reduced the number of people required to operate the loom from two to one. The geographical distribution of the textile industry has changed dramatically over the last 50 years. Textile manufacturers have converted part of their textile production facilities from manual labour to automation [7]. According to a report in the Wall Street Journal, it is ironic that robotics is only now finding its way into the textile industry, as this sector was one of the first to be mechanised in the 18th century. Of course, there are already some aspects of automation in textile production. However, for a long time, only certain tasks could be reliably automated (e.g. yarn production, carding, blending cotton, etc.). For more complex tasks, human dexterity was always required. The problem is that fabrics are a fickle medium. K.P. Reddy from SoftWear Automation says: *“One of the biggest technical challenges is really that material flows. It stretches and gets deformed every time you touch it”* [12].

Since the Covid-19 pandemic hit the world, many textile manufacturers have had to do a 180° turnaround in their operations to keep up with the changing demand for textiles. Some manufacturers rushed to switch their operations to producing face masks to reduce the transmission of the virus. Other manufacturers saw the demand for their products change dramatically and were forced to reorganise their operations to respond. Textile manufacturers around the world are looking for new ways to improve their processes to keep up with the rapidly changing industry. Robotics is one of the most reliable technologies for responding quickly to change. Unlike other forms of automation, robots

are very adaptable. With the right tools, a product line can be changed within hours, days or weeks. Not many months as with other types of automation [12].

### 3. Technological advances in textile robotics and automation

The textile industry has seen significant technological advances with the integration of robotics that have fundamentally changed manufacturing processes and capabilities. The advent of robotics has increased the flexibility of textile production lines to accommodate customization and small batch production without significant downtime or reconfiguration costs. This is particularly beneficial in an industry where consumer demand for personalized products is growing [3,5,13].

Also, advances have not only improved the efficiency and precision of textile production, but have also opened up new avenues for innovation and product development. Some of the most significant are in the areas of: textile manufacturing, material handling and manipulation, dyeing and finishing, sewing, complex tasks, quality control and folding and packaging.

#### 3.1. Textile manufacturing

There are several areas of automation in the manufacture of textiles, including yarn and fabric production. Robotics is used in the blower room for handling bales. Samples of the bales are sent to a classification laboratory for observation. The quality of the consignment is checked as soon as it is received. Each bale is then transported via the conveyor belt to a loading station. There it is removed by a robot and taken to the warehouse. All bales in the blower hall are stored randomly on shelves, with the position of the bales matching the bale number, weight and fibre characteristics. When a bale is selected for processing, it is removed from the warehouse by a robot according to the “first in, first out” principle [14].

Robotics are also used during carding. The robot could be programmed to pick up the cans from each card, load them onto a truck and transport them to a production area where they are pulled onto a frame for conventional operation. This can result in excellent blending and it will be easy for an operator to clear the cans from the fence into a line [14]. Robotic technology is used for splicing in auto-coners and other winders (Fig. 1).

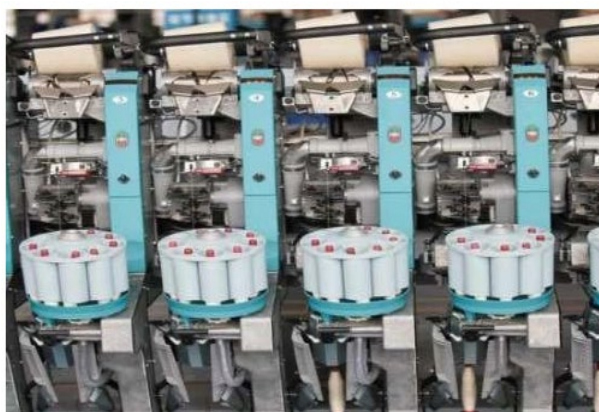


Figure 1. Robotic auto coner [14]

Each time there is an end break or bobbin change. The yarn ends are joined with a splice that is practically similar to the yarn. The strength and elongation values of the spliced connection are almost always comparable to those of the yarn itself, namely 90. The latest automatic splicer arm is a kind of robot. It offers an even better opening of the yarn ends and a more favourable overlap in the splice area [14].

### 3.2. Material handling and manipulation

Robotics technology has vastly improved the handling of delicate and varied materials used in the textile industry [3,10]. Automated systems can now feed textile through machines consistently and accurately, reducing material waste and improving cut quality [7]. Robotics arms equipped with specialized grippers can handle delicate materials without causing damage, ensuring the integrity of materials through all stages of production [11].

A notable example of innovative robotics in textile material handling is KUKA's implementation of small robotics in textile production (Fig. 2). KUKA, a global leader in industrial automation, has developed robotic solutions tailored to the textile industry's specific needs. Their small robotics systems are designed for high precision and flexibility, essential for operations like grabbing, sewing, weaving, and fabric cutting [11].



**Figure 2.** Small robot grabbing fabric, Kuka [11]

### 3.3. Dyeing and finishing

The dyeing and finishing stages of textile production are critical for the aesthetics, performance and quality of the end product. Traditionally, these processes are energy-intensive and require significant use of chemicals, posing a challenge to environmental sustainability and operational efficiency. The dyeing process uses large amounts of water and chemicals to achieve the desired colour and properties of the textiles. This method not only consumes considerable resources, but also produces waste water that can be harmful to the environment if not treated properly. The finishing process, which gives the textiles the desired properties such as softness, wrinkle resistance or water repellency, also often relies on further chemical treatments and extensive manual processing [2].

Advances in automation have led to modern systems that solve these problems. For example, Fongs' automated dyeing machines, which reduce water consumption by around 30% and dye consumption by up to 15% compared to conventional dyeing methods [15], or Fongs' ALLWIN Plus high-temperature dyeing machine (Fig. 3) [16], which uses an extremely low liquor ratio of 1:4.



**Figure 3.** ALLWIN Plus High Temperature Dyeing Machine [16]

### 3.4. Sewing

Sewing, a key process in textile manufacturing, is traditionally labour-intensive and requires a high level of precision and consistency that is difficult to achieve on a large scale. The automation of sewing operations using robotics represents a significant technological leap in the textile industry, offering improvements in production speed, quality control and the ability to consistently realise complex designs [3,6].

The biggest challenge in automating sewing lies in handling soft, flexible textiles that can shift or stretch unpredictably during the sewing process. In addition, sewing requires dynamic adjustments depending on the type of textile, thickness and design to be realised. It is a major hurdle for robotic systems to achieve the same level of dexterity and adaptability that experienced human operators possess [3,10].

One of the most innovative examples of sewing automation is the Sewbot developed by SoftWear Automation. The Sewbot is a series of fully automated sewing robots that use patented computer vision systems to track and adjust fabric movement in real time. This technology solves the challenge of fabric variability and alignment, which is critical for high quality seams [3]. The Sewbot's vision system analyses the textile being sewn, detects distortions or misalignments and dynamically adjusts the sewing needles to correct these issues on the fly (Fig. 4). This system ensures that the seams are consistent regardless of



fabric irregularities. The result is uniform product quality that rivals or even surpasses manual sewing operations [3,7,17].



**Figure 4.** Automated sewing robot [7]

### 3.5. Automation of complex tasks

Modern robotics has enabled the automation of complex tasks in textile manufacturing that were traditionally labour intensive and prone to human error. These include intricate fabric cutting, precise pattern making and automated sewing processes. Robots equipped with high-resolution cameras and sensitive touch sensors can now identify and process fabrics with an accuracy that surpasses manual capabilities. Levi Strauss & Co, one of the largest branded apparel companies in the world and a global leader in jeanswear, has been at the forefront of introducing innovative technologies to improve its manufacturing processes. One of the most groundbreaking advances is the introduction of automated laser technology for the finishing of jeans, which has significantly changed the way the iconic denim is processed and designed [3,18].



**Figure 5.** Finishing effect on jeans [18]

Levi Strauss & Co. has introduced a new operating model called Project F.L.X. (Future-Led Execution), which integrates laser technology into the denim finishing process. Traditionally, the finishing of jeans – the fading, distressing, and whiskering to achieve the final aesthetic (Fig. 5) has been a very manual and labour-intensive process. To achieve the desired effects, manual finishing and chemical treatment was required, which not only took a lot of time, but also had a heavy impact on the environment. The automated laser technology used by Levi Strauss & Co. utilises high-precision lasers to "burn" patterns into denim, replacing the older manual techniques that involved chemical processing and physical abrasion [3,18].

### 3.6. Quality Control

Advances in vision systems have improved quality control processes in the textile industry. These systems utilise advanced algorithms to inspect textiles for defects or inconsistencies at various stages of the production line. By detecting problems early in the production process, robotic quality control helps to minimise waste and ensure that end products meet strict quality standards [6].

Traditionally, quality control was a labour-intensive process that relied on human inspection of defects or inconsistencies in materials and finished products. However, the integration of robots and computer vision technologies has revolutionised this aspect of production and significantly improved the efficiency, accuracy and reliability of quality assessment [6-8,17].



**Figure 6.** A1 weaving machine [19]

Several leading textile manufacturers have successfully integrated robotic quality control systems into their production lines. Automated inspection stations, for example, scan textiles running on a conveyor belt and identify and categorise defects such as stains, tears or incorrect seams. These systems can mark faulty areas with high precision and forward the items for correction or disposal depending on the severity of the problem [3]. Lindauer DORNIER GmbH, for example, is known for its high-quality textile machinery and innovative solutions that cover various aspects of fabric production, including weaving, finishing and treatment. One of their notable advances in ensuring product quality is the

integration of sophisticated quality control systems into their machines, such as the A1 weaving machine (Fig. 6). This machine is an example of how automation and advanced technology are used to improve the quality and efficiency of textile production [19].

### 3.7. Robotics for folding and packaging

The folding and packing of products can be carried out by robots. They can take the garment, fold it and then pack it properly [7]. The Smart Robot Assistant (Fig. 7) is customised for each application and consists of an autonomous vehicle, a flexible robotic arm, a 3D stereo camera system, a PLC and software. The robot drives autonomously and can pick up pallets directly from the floor without assistance. The robotic arm of the device can lift loads weighing up to 45 kg, while the pallet lifter on the vehicle platform can lift 1,200 kg. ONTEC customised the vehicle and the robotic arm was supplied by FANUC (Oshino-mura, Yamanashi Prefecture, Japan) [20].



**Figure 7.** Smart robot assistant for folding and packaging [20]

## 4. Conclusion

The literature reviewed emphasises the transformative potential of robotics in the textile industry. As robotics continues to evolve, its integration into textile manufacturing processes promises to bring further benefits in terms of efficiency, safety and sustainability. Future research should focus on technological advances that could facilitate wider adoption of robots in smaller textile operations and promote an industry-wide shift towards more sustainable and humane production processes.

In the global market, survival in the competitive apparel industry depends on the advanced technology, automation and robotics used in the industry from design to production process to product transportation. There is no doubt that automation can increase production efficiency, reduce the number of errors and lower the overall cost of production.

## 5. References

- [1] Rosenberg, Zoe B.; Joines, Jeff. A. and Jur, Jesse S. Simulation of Automated Handling in Textile Manufacturin of US Military Apparel to Improve Efficiency and Quality // 2nd IFSA inter Conference on Automation, Robotics & Communications for Indrustry 4.0(ARCI' 2022) / Yurish, Sergey Y.(ed.) (ISBN 978-84-09-37741-1). Andorra: Andorra la Vella, 2.2. – 3.2.2022.
- [2] Tkalec, Marijana; Sutlović, Ana and Glogar, Martinia Ira. Ecological, Economic and Social Aspects of Textile Dyes // 81st International Scientific Conference on Economic and Social Development – „Green Econom & Sustainavle Development“ / Z. Baracskai(ed.), I. B. Katanec(ed.), T. Hublin(ed.)(ISSN 1849-7535). Čakovec 6.5.-7.5.2022.
- [3] Salahuddin, Mir and Lee, Young-A. Automation with Robotics in Garment Manufacturing. Springer Nature Switzerland AG 2022. (ISBN 978-3-030-91135-5\_5)
- [4] <https://www.intellichief.com/automation-vs-robotics-choosing-technology-for-business/>,assessed: 29.7.2024.
- [5] <https://www.bcg.com/publications/2019/advanced-robotics-factory-future>, assessed: 20.7.2024.
- [6] Gries, Thomas et al. Automation in quality monitoring of fabrics and garment seams// Woodhead Publishing, 2018 (ISBN 978-0-08-101211-6)
- [7] <https://indiantextilejournal.com/application-of-robotics-in-textile-industry-a-review-of-recent-advances/>, assessed: 26.7.2024
- [8] Graf, Holger and Mohamed, Hoda. Robotization and employment dynamics in German manufacturing value chains// Structural Change and Economic Dynamics, 68(2024), 133-147. (ISSN 0954349X)
- [9] Zhao, Yantong et al. Impact of industrial robot on labour productivity: Empirical study based on industry panel dana // Innovation and Green Development, 3(2024), 2; 1–10. (ISSN 29497531)
- [10] Jiménez-Schlegl, Pablo; Čubrić, Goran Robots in the Textile and Fashion Industries. Facts and Prospectives // 11th Scientific-professional symposium Textile science and economy / Ercegović Ražić, Sanja; Glogar, Martinia Ira; Novak, Ivan (eds.). (ISSN 2584-6450). Zagreb: University of Zagreb Faculty of Textile Technology, 24.1.2018. pp 1–8
- [11] [https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2022/06/robotextile\\_small-robotics-in-textile-production](https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2022/06/robotextile_small-robotics-in-textile-production), assessed: 27.7.2024.
- [12] <https://www.automate.org/robotics/news/9-excellent-robot-applications-in-the-textile-industry>, assessed 29.7.2024.
- [13] Yick, Kit Lun; Hui, Chiyuen Yuen. Sew-free technologies for intimate apparel. Elsevier Inc., 2016. (ISBN 978-1-78242-369-0)
- [14] Jindal, Harsh; Kaur, Spinder. Robotics and Automation in Textile Industry // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, 8(2021), 3; pp 40-45. (ISSN 2394-4099)

- [15] <https://www.knittingindustry.com/monforts-eco-applicator-makes-an-impact/>,  
assessed: 29.7.2024.
- [16] <http://www.fongsengineering.com/en-us/products/detail/26> , assessed: 29.7.2024.
- [17] <https://textilefocus.com/automation-robotics-blessings-apparel-industry/>, assessed:  
26.7.2024,
- [18] [https://www.levi.com/US/en\\_US/blog/article/levis-presents-future-finish](https://www.levi.com/US/en_US/blog/article/levis-presents-future-finish), assessed:  
29.7.2024.
- [19] Dornier Weaving catalog <https://pdf.directindustry.com/pdf/dornier-gmbh-lindauer/a1/74168-881339.html>, assessed: 29.7.2024. V. Sanchez, C. J. Walsh, R. J. Wood. Textile Technology for Soft Robotic and Autonomous Garments
- [20] <https://www.vision-systems.com/factory/robotics/article/14278192/robotic-system-loads-bobbins-in-textile-manufacturing-process>, assessed: 29.7.2024.



## Korištenje web servera u Siemens LOGO! aplikacijama *Using the web server in Siemens LOGO! applications*

Z. Busija<sup>1\*</sup>, S. Švooger<sup>1</sup>, J. Srpak<sup>1</sup>, L. Horvat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište Sjever, 104. Brigade 3, 42000 Varaždin, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [zbusija@unin.hr](mailto:zbusija@unin.hr)

### Sažetak

Rad opisuje primjenu kompaktnog kontrolera LOGO!, proizvođača Siemens AG. Jednostavni proces kojim upravlja LOGO! je izgrađen od elektro-pneumatskih komponenti. Ukratko je opisana izrada programa za kontroler pomoću programa LOGO! Soft Comfort. Istražena je mogućnost korištenja web servera pomoću kojeg se uređaju može pristupiti putem Internet mreže. Pokazano je kako se može pratiti rad udaljenog procesa pomoću opcije "LOGO! BM", te kako se mogu mijenjati parametri procesa pomoću opcije "LOGO! TDE". U zadnjem dijelu, web serveru se pristupa putem mobilnog telefona.

**Ključne riječi:** LOGO!, LOGO! Soft Comfort, web server

### Abstract

The paper describes the application of the compact controller LOGO!, produced by Siemens AG. A simple process managed by LOGO! is built from electro-pneumatic components. The creation of the program for the controller using the program "LOGO! Soft Comfort" is briefly described.

The possibility of using a web server with which the device can be accessed via the Internet was investigated. It is shown how the operation of a remote process can be monitored using the "LOGO! BM" option, and how process parameters can be changed using the "LOGO! TDE" option. In the last part, the web server is accessed via a mobile phone.

**Key words:** LOGO!, LOGO! Soft Comfort, web server

### 1. Uvod

Prilikom automatizacije raznih industrijskih procesa danas se, čak i za manje primjene, redovito koriste programabilni upravljački sklopovi [1]. Za upravljanje manje zahtjevnim procesima danas se koriste modularni logički kontroleri, kao što je LOGO!. Iako imaju zajedničke karakteristike s tradicionalnim programabilnim logičkim kontrolerima (PLC-ovima), LOGO! je specijaliziran za jednostavnije i manje zahtjevne aplikacije, kao na primjer u [2-4], dok su PLC-ovi namijenjeni za kompleksnije industrijske zadatke [5]. Od kada je predstavljen od tvrtke Siemens AG (1996. godine), LOGO! se kontinuirano unapređuje, dodaju mu se nove funkcionalnosti i poboljšavaju mu se performanse. U početku je

zamišljen kao zamjena za konvencionalne releje i vremenske sklopke, a zatim mu je dodano više ulaza i izlaza, poboljšana memorija, te u idućoj etapi razvoja, zaslon i mogućnost povezivanja s drugim industrijskim sustavima pomoću komunikacijskih protokola kao što je *AS-Interface*. Softver za programiranje, LOGO! Soft Comfort, (u upotrebi od 2004. god.) omogućio je korisnicima jednostavno kreiranje, testiranje i simulaciju logičkih sklopova putem grafičkog sučelja i time povećao pristupačnost LOGO! modula širokom krugu korisnika. Model LOGO! 0BA6 je predstavljen 2008. god. Uključivao je više memorije, dodatne ulazno-izlazne module i mogućnost Ethernet komunikacije, što je omogućilo bolje povezivanje i kontrolu u mrežnim okruženjima. Značajni korak u razvoju se dogodio 2014. godine kada je predstavljen model LOGO! 8. Ovaj model je imao integrirani web server za daljinsku kontrolu i praćenje, bolju Ethernet povezivost, te podršku za komunikacijske standarde kao što su Modbus TCP/IP. Osim toga, novi dizajn sučelja dodatno je olakšao programiranje i konfiguraciju, te dodatne primjene [6]. Do danas je razvijena mogućnost izrade korisničkog web sučelja i povezivanje s cloud platformama za naprednu analitiku i daljinsko upravljanje.

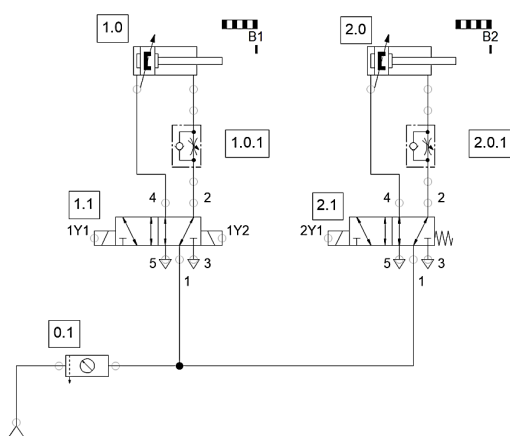
U ovom radu je opisano korištenje web servera na LOGO! 8 logičkom modulu [7] za upravljanje jednostavnim elektro-pneumatskim procesom.

## 2. Opis procesa koji će se automatizirati

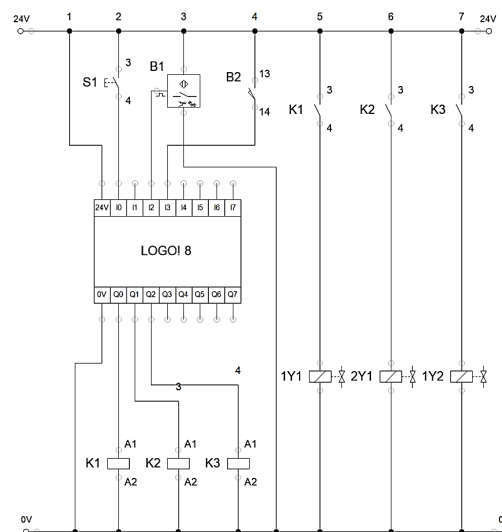
Za potrebe testiranja zamišljen je jednostavni elektro-pneumatski sustav kod kojeg jedan pneumatski cilindar dodaje obradak u prešu, a drugi potom utisne oznaku na obradak. Kod ovog postupka potrebno je programski omogućiti zadavanje broja obradaka na koje će se utisnuti oznaka.

### 2.1. Pneumatska shema sustava

Dva cilindra kojima se upravlja elektromagnetskim 5/2 ventilima (razvodnicima) spajaju se prema shemi sa slike 1.



Slika 1. Pneumatska shema



Slika 2. Električna shema

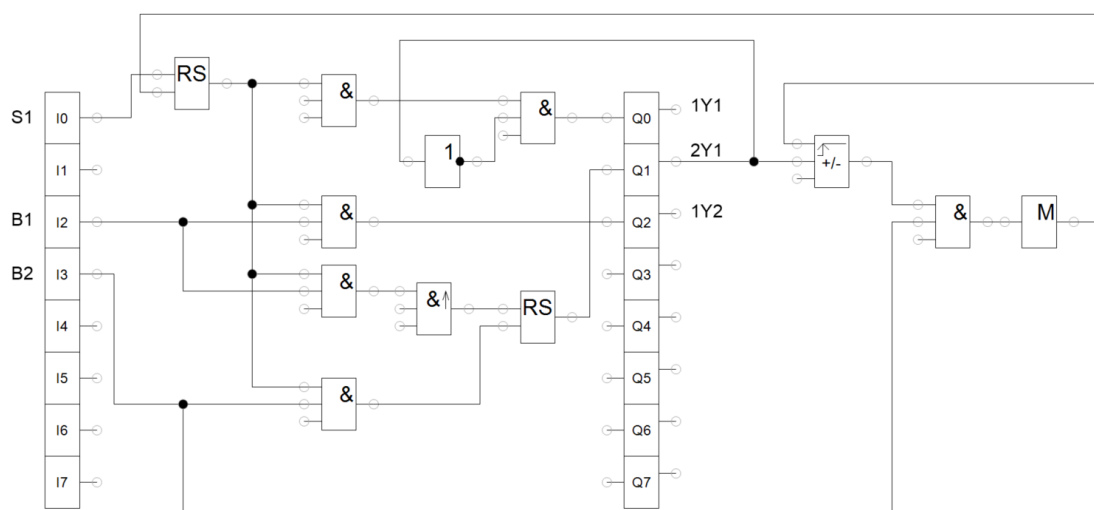
Cilindrom 1.0 upravlja bistabilni razvodnik 1.1, a cilindrom 2.0 upravlja monostabilni razvodnik 2.1. Pomoću jednosmjerno prigušnih ventila (1.0.1 i 2.0.1) se podešavaju brzine izvlačenja klipova. Detekcija krajnjeg položaja klipnjače određuje se pomoću senzora B1 i B2.

## 2.2. Električna shema sustava

Ovim sustavom će upravljati logički modul LOGO! na čiji ulaz I0 je spojeno tipkalo koje pokreće sustav. Na ulaz I2 je spojen optički senzor koji prati da li je obradak postavljen u radni položaj, a na I3 je spojen senzor krajnjeg položaja koji dojavljuje da je oznaka utisnuta na obradak. Na izlaze Q0 i Q2 su spojeni svitci 1Y1 i 1Y2 razvodnika 1.0. Na izlaz Q1 je spojen svitak 2Y1 razvodnika 2.0. Električna shema je prikazana slikom 2.

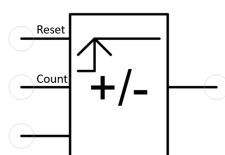
## 2.3. Program logičkog kontrolera

Program za kontroler je napisan u FBD (engl. *Function Block Diagram*) programskom jeziku i prikazan na slici 3.



**Slika 3.** Program logičkog kontrolera

Programski jezik i načini programiranja kontrolera ovdje nije tumačen već se samo opisuje funkcija korištenog programskog bloka, kao što je brojač (engl. *counter*), na slici 4.



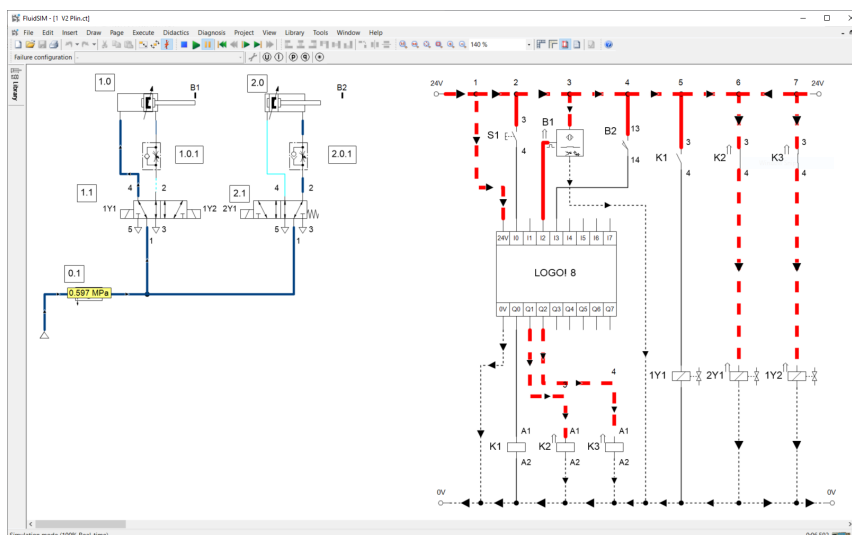
**Slika 4.** Blok brojača

Prije pokretanja programa dvoklikom na blok treba postaviti vrijednost brojača. Svakim dovođenjem logičke jedinice na priključak "Count" vrijednost varijable se povećava za jedan. Kada varijabla dostigne prvotnu postavljenu vrijednost brojača, na izlazu bloka će se pojaviti logička jedinica. Dovođenjem logičke jedinice na priključak "Reset" brojenje počinje iznova.



### 2.3. Simulacija rada procesa

S obzirom da je cijeli prikazani proces opisan pomoću softvera FluidSim 5 [8] koji prodaje tvrtka Festo Didactic SE na kraju se provodi interaktivna simulacija rada cijelog sustava. Tijekom simulacije vidi se gibanje pojedinih aktuatora, protok zraka kroz pneumatsku instalaciju, preklapanje razvodnika, protok signala koje senzori daju...

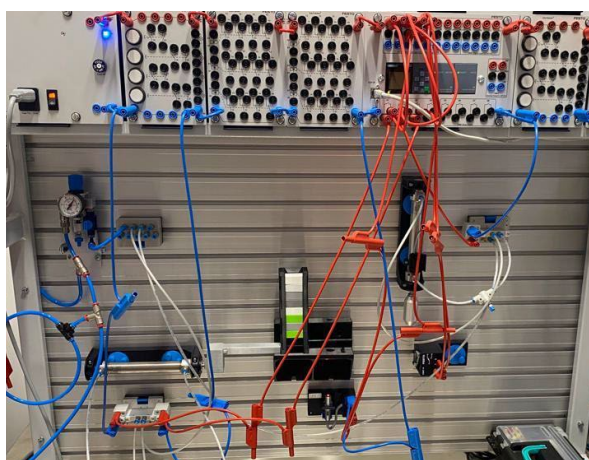


**Slika 5.** Interaktivna simulacija rada sustava upravljanog logičkim kontrolerom

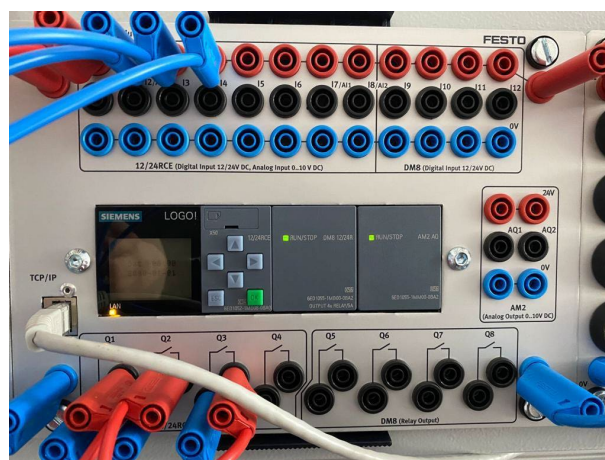
Ukoliko se dvoklikom otvori logički modul može se analizirati rad programa tijekom simulacije. Ovaj softver se koristi za izradu virtualnih sustava koji tijekom učenja zamjenjuju stvarna postrojenja. Nakon što je simulacijom provjereno da će sustav raditi na zamišljeni način, kreće se na spajanje komponenti i programiranje pravog LOGO! uređaja.

### 3. Spajanje sustava za testiranje

Komponente sustava za testiranje su spojene prema shemama sa slike 1 i slike 2. Gotov izgled sustava prikazuje slika 6, dok se korišteni logički modul nalazi na slici 7.



**Slika 6.** Sustav za testiranje

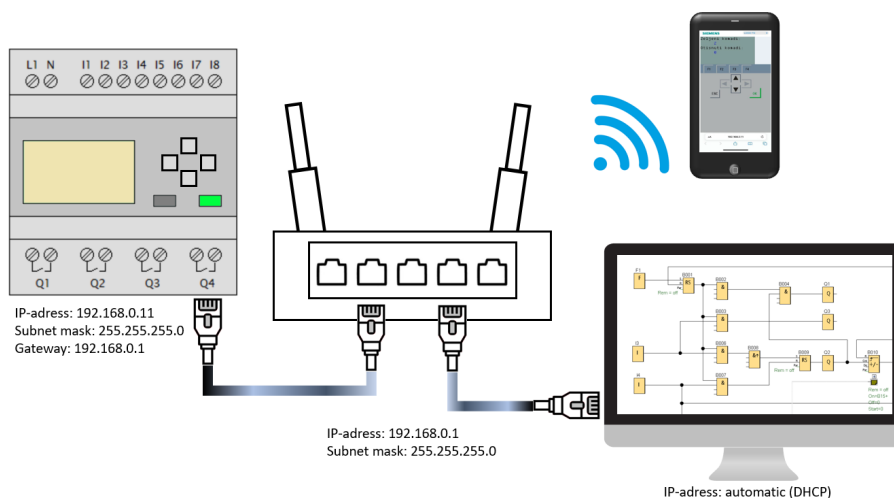


**Slika 7.** Korišteni LOGO!

Korišten je LOGO! (12/24RCE 6ED1052-1MD08-0BA0) sa dodatnim modulom DM8 koji dodaje četiri digitalna ulaza (12/24R 6ED1055-1MB00-0BA2 output 4x relay/5A) i dodatnim modulom AM2 sa dva analogna izlaza AM2 (AQ 6ED1055-1MM00-0BA02).

### 3.1. Računalna mreža

Za prijenos programa na LOGO! ali i za kasniju komunikaciju potrebno je LOGO! priključiti na računalnu mrežu. Ovdje se koristi jedan bežični usmjernik (engl. *router*) na koji će se priključiti LOGO! i PC računalo. Ova mreža neće biti spojena na Internet ali će biti dovoljna za testiranje web servera koji je ugrađen u LOGO! kontroler.

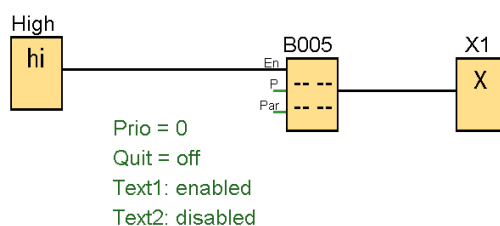


**Slika 8.** Povezivanje uređaja u računalnu mrežu

LOGO! je dobio IP adresu 192.168.0.11, a u polje Gateway je upisana adresa usmjernika 192.168.0.1. Računalu je usmjernik dodijelio IP adresu i nije ju potrebno mijenjati. Na ovako podešenu mrežu možemo se spajati mobilnim uređajima putem Wireless veze.

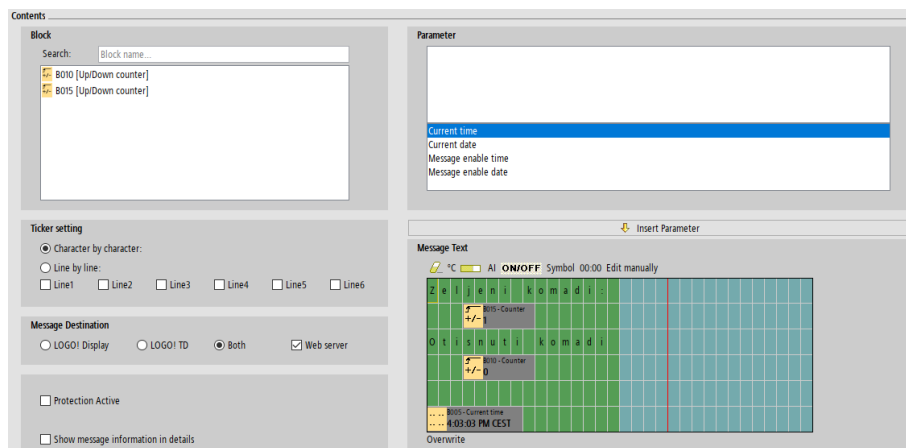
### 3.1. Pisanje programa za LOGO! logički kontroler

Za pisanje programa se koristi softver Logo Soft Comfort [9] koji se pokreće na PC računalo. Ovaj softver osim pisanja programa omogućuje simulaciju izvođenja programa i prijenos programa na LOGO! kontroler. Za programiranje treba odabrati tip uređaja LOGO! 8.FS4 ili LOGO! 8.FS5. Pošto se koristi isti programski jezik ovaj program izgleda gotovo isto kao i program napisan unutar softvera FluidSim 5. Osim osnovnog programa koji je prikazan na slici 3 dodaju se blokovi koji su vezani uz LOGO! kontroler.



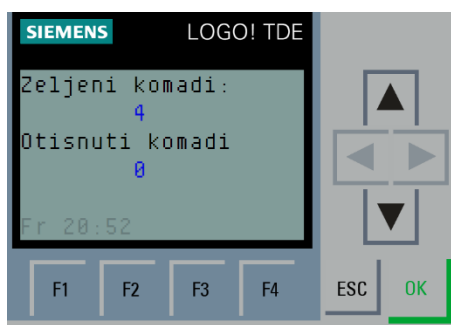
**Slika 9.** Blokovi za ispisivanje poruka na zaslonu kontrolera

Na slici 9 su vidljivi blokovi kojima se programira tekst koji će se ispisivati na zaslonu kontrolera. Postavke bloka B005 – *Message text* prikazane su na slici 10.



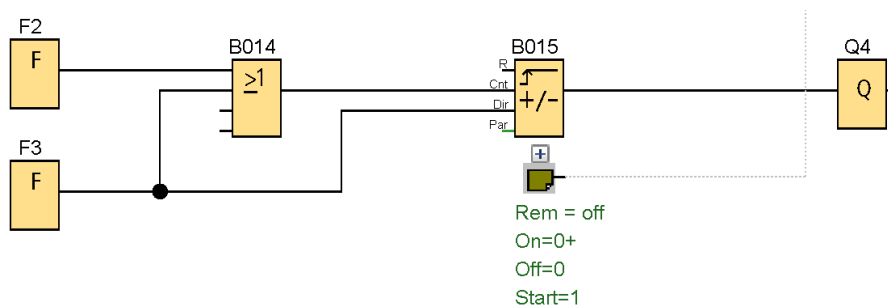
**Slika 10.** Postavke bloka za ispisivanje poruka

U dijelu koji je prikazan zelenom bojom se vidi prostor zaslona. U ta polja se može upisivati tekst i dodavati varijable iz blokova koji su prikazani u polju *Block*. U polju *Message destination* potrebno je odrediti gdje će se poruke vidjeti. LOGO! Display je zaslon na uređaju, LOGO! TD (TD od engl. *TextDisplay*) je dodatni zaslon koji se može dodatno nabaviti i povezati s LOGO! modulom. U ovom projektu se ne koristi uređaj LOGO! TD ali je ipak uključena opcija za prikaz na oba ekrana (engl. *Both*) jer će se prikaz simulirati na zaslonu računala. Dodatno je kvačicom uključena opcija *Web server* kako bi prikaz bio vidljiv unutar Internet preglednika na računalu ili mobilnom uređaju.



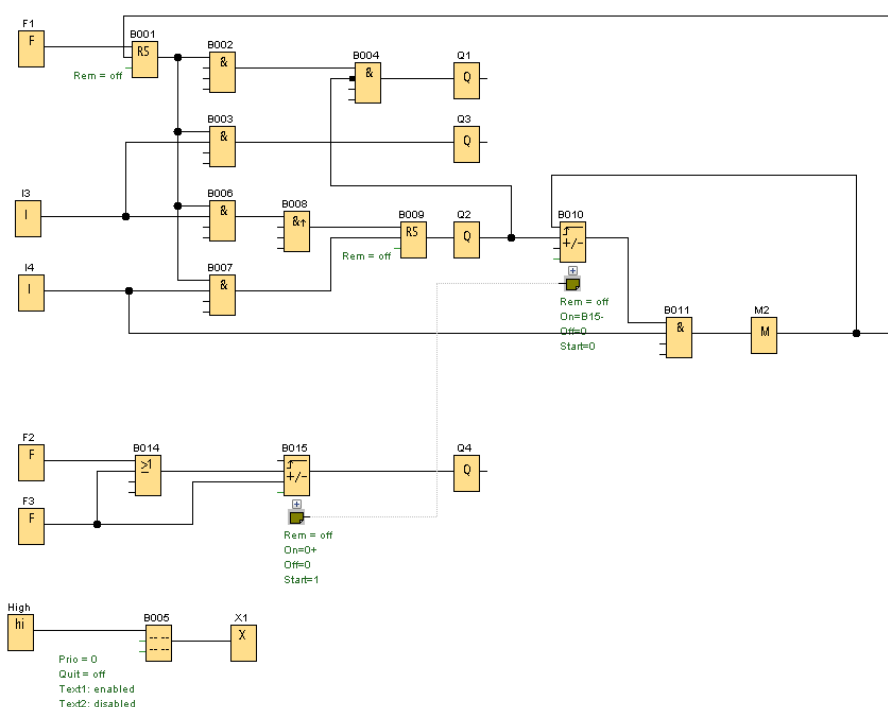
**Slika 11.** Izgled zaslona kakav bi se vidio na LOGO! TD

Na slici 11 je vidljivo da su osim poruka koje smo zadali blokom *Message text* dostupne i funkcijske tipke koje se mogu zadati kao ulazi u FBD programu. Virtualna tipka F1 će se koristiti za pokretanje programa, umjesto tipkala S1 sa električne sheme na slici 2. Tipkom F2 će se povećavati, a tipkom F3 će se smanjivati željeni broj komada za utiskivanje. Ovaj dio programa prikazuje slika 12.



Slika 12. Blokovi za postavljanje željenog broja komada

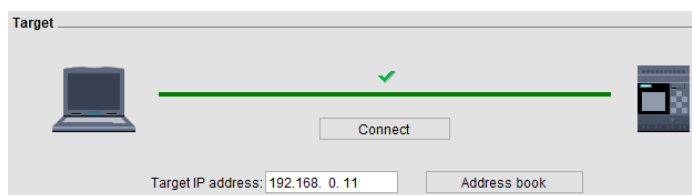
Konačni program koji će se prenijeti na LOGO! kontroler prikazan je slikom 13.



Slika 13. Konačni izgled programa koji se prenosi na LOGO!

### 3.2. Pokretanje Web servera

Do sada je prikazano kako se kroz LOGO! program ispisuju poruke i varijable na zaslonu uređaja. Ukoliko se želi da taj prikaz bude dostupan putem računalne mreže potrebno je pokrenuti Web server. Bira se opcija **File** → **Properties ...** → **Online settings**



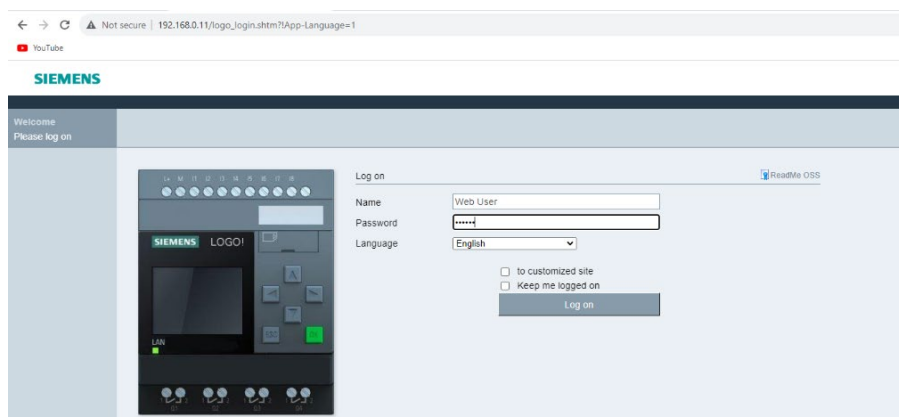
Slika 14. Uspostavljanje komunikacije s kontrolerom

Nakon što se uspostavi komunikacija, bira se opcija **Acces control settings**, pa se u odjeljku **Web server access** uključi opcija **Allow Web server access**. Postavlja se zaporka i klikom na **Apply** potvrde postavke. Web server se nalazi na uređaju LOGO! i navedenim postupkom

mu se može pristupiti pomoću bilo kojeg uređaja koji se nalazi u zajedničkoj računalnoj mreži.

### 3.3. Pristup Web serveru

U Internet preglednik se upisuje IP adresa uređaja LOGO!, otvara se prozor sa slike 15, upisuje zaporka koja je prethodno postavljena i pričekava da se računalo spoji na server.



Slika 15. Pristup Web serveru putem Internet preglednika

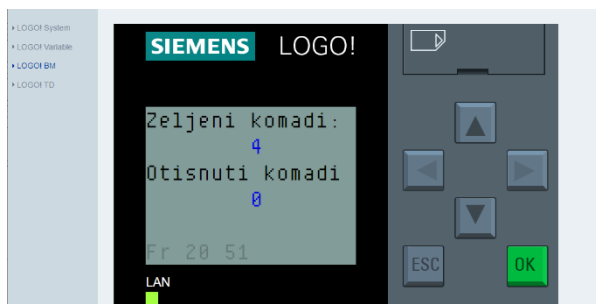
Nakon spajanja sa serverom vidljiv je izbornik s nekoliko opcija: LOGO! System, Variable, BM i TD.



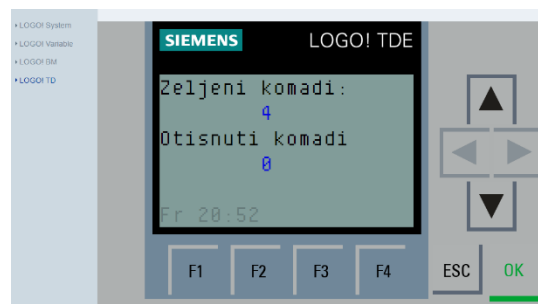
Slika 16. LOGO! System zaslón

LOGO! System (slika 16) prikazuje podatke o uređaju na koji smo spojeni, LOGO! Variable daju prikaz pojedinih varijabli koje su trenutno dostupne, a LOGO! BM (BM od engl. *Basic Module*) daje prikaz uređaja u realnom vremenu i vidljiv je na slici 17.

Zanimljiv je LOGO! TD prikazan slikom 18 jer se na njemu pritiskom na tipke F2 i F3 podešava željeni broj komada, a pritiskom na F1 pokreće izvođenje programa.

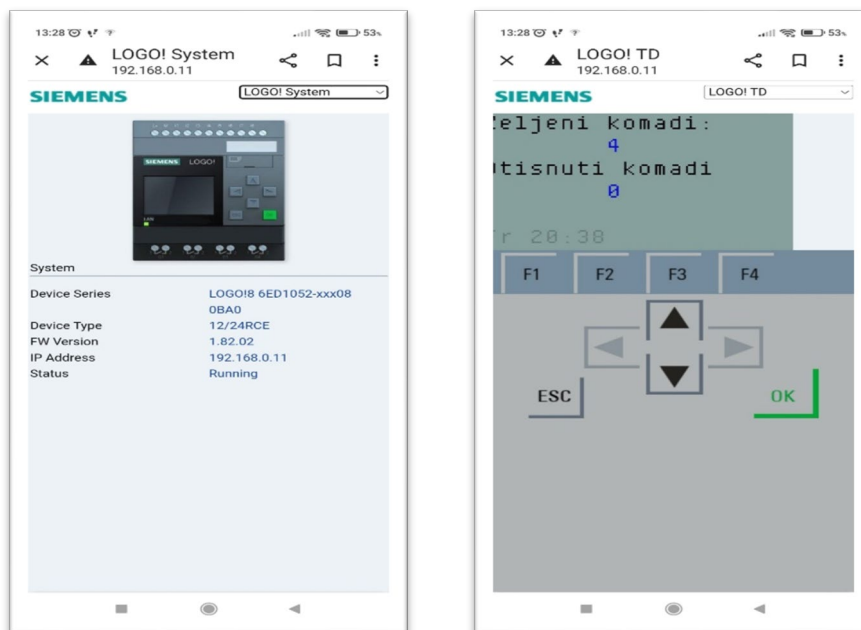


Slika 17. LOGO! BM zaslón



Slika 18. LOGO! TD zaslón

Ukoliko se mobilnim uređajem spoji na bežičnu mrežu usmjernika pa putem Internet preglednika pristupi web serveru uređaja LOGO! dobiju se iste funkcionalnosti kao i na računalu.



Slika 17. Pristup Web serveru putem mobilnog uređaja

## 5. Zaključak

Nakon simulacije rada sustava pomoću softvera FluidSim i spajanja komponenti testnog sustava napisan je program pomoću softvera Logo Soft Comfort. Na LOGO! logičkom kontroleru je pokrenut Web server kojem je pristupljeno pomoću računala i mobilnog uređaja.

Time je pokazano je da se pomoću Web servera ugrađenog u logički kontroler LOGO! može upravljati jednostavnim elektro-pneumatskim procesima.

## 6. Literatura

- [1] D. Srpak, Opravdanost primjene PLC-a kod jednostavnih izvedbi upravljanja, *Tehnički vjesnik*, vol. 15, no. 4; pp. 49-53. (2008), (<https://www.bib.irb.hr/739575>)
- [2] S. Zhang, Y. Liu, X. Li, X. Wang, J. Lu, X. Tao, Design of control system based on Siemens (LOGO!) for vegetable greenhouse, *Applied science, materials science and information technologies in industry*, vol. 513-517, pp. 3300-3304, 2014, doi 10.4028/www.scientific.net/AMM.513-517.3300
- [3] G. Singh, A. Agarwal, R. K. Jarial, V. Agarwal, M. Mondal, PLC Controlled Elevator System, *Students Conference on Engineering and Systems (SCES) - Inspiring Engineering and Systems for Sustainable Development*, Allhabad, India, apr. 12-14, 2013,
- [4] A. Oarcea, V. Cobilean, S. D. Stan, A. Boziean, Control Process for an Industrial Bending Machine Designed for Metal Processing, *Proceedings of I4SDG Workshop 2021:*

*IFToMM for Sustainable Development Goals*, vol. 108, pp. 471-480, 2022, doi 10.1007/978-3-030-87383-7\_51

- [5] J. Tarnawski, P. Kudelka, M. Korzeniowski, Advanced Control With PLC-Code Generator for aMPC Controller Implementation and Cooperation With External Computational Server for Dealing With Multidimensionality, Constraints and LMI Based Robustness, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10597-10617, 2022, doi 10.1109/ACCESS.2022.3142054
- [6] J. M. Vargas-Cruz, C. E. Vidal-Villeda, C. Alberto, P. Camelo-Romero, Water Consumption Monitoring System and Home Automation Based on LOGO! 8.3 and AWS Cloud Connection, *10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, pp. 179-183, 2022, doi 10.1109/ICCMA56665.2022.10011459
- [7] <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ED1052-1MD08-OBA0>
- [8] <https://www.art-systems.de/www/site/en/fluidsim/index.html>
- [9] <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/logo/logo-software.html>

## Ispitivanje adhezijskih svojstava ostvarenih različitim postupcima aplikacije temeljnih premaza *Examination of adhesion properties achieved by different methods of primer application*

T. Šolić<sup>1,\*</sup>, D. Marić<sup>1</sup>, I. Deanović<sup>1</sup>, B. Kovačević<sup>1</sup>, M. Pintarić<sup>1</sup>, D. Takač<sup>2</sup>,  
I. Samardžić<sup>1</sup>, M. Samardžić<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>2</sup>Slavonija DI d.o.o., Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>3</sup>FI Group d.o.o., Slavonski Brod, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [tsolic@unisb.hr](mailto:tsolic@unisb.hr)

### Sažetak

Konstruktivski materijali podložni su razaranju uzrokovanom razvojem korozivnih mehanizama. U najvećoj mjeri tu prednjači razvoj elektrokemijskog mehanizma, tj. odvijanje procesa elektrokemijske korozije. Poznavajući karakteristike procesa, jasno je kako je prvi preduvjet za razvoj istih prisutnost električki vodljive sredine. U skladu s tim, ukoliko se iste želi zaustaviti ili usporiti, potrebno je stvoriti barijeru između štice materijala i agresivne okoline. Barijeru se može stvoriti primjenom različitih tehnologija površinske zaštite, a najzastupljenija je svakako aplikacija organskih premaza. U prilogu tome ide i činjenica da je gotovo 75% čeličnih konstrukcija zaštićeno upravo na taj način. Međutim važno je znati kako uspješnost takve vrste zaštite ne ovisi samo o kvaliteti komponenti od kojega je zaštitni premaz izrađen, niti samog apliciranog sustava, nego zaštitni efekt uvelike ovisi o kvaliteti pripreme površine kao i o kvalitetnoj aplikaciji zaštitnog sustava na materijal koji je predmet zaštite. Ovisno o karakteristikama pozicija koje se štite, načini na koje se aplikacija organskih premaza provodi su aplikacija kistovima, valjcima, zračnim i bezračnim prskanjem. Najčešći argument za odabir nekog od spomenutih načina aplikacije je svakako produktivnost, no upravo ovim radom želi se skrenuti pažnja kako to ne treba biti jedino mjerilo. Uz dobra kohezijska svojstva premaza te veze između svakog apliciranog sloja, izuzetno je važna adhezijska veza između temeljnog premaza i površine štice materijala. Provedbom eksperimentalnih ispitivanja u kojima je temeljni premaz istih karakteristika apliciran različitim postupcima, metodom urezivanja mrežica je ustanovljeno kako postoje razlike u ostvarenim adhezijskim vezama temeljnog premaza i podloge.

**Ključne riječi:** korozija, zaštita metala, temeljni premaz, adhezijska svojstva, metoda urezivanja mrežica



## Abstract

Construction materials are subject to destruction caused by the development of corrosion mechanisms. To the greatest extent, the development of the electrochemical mechanism, i.e. the unfolding of the electrochemical corrosion process, is leading here. Knowing the characteristics of the process, it is clear that the first prerequisite for their development is the presence of an electrically conductive environment. Accordingly, if one wants to stop or slow down the same, it is necessary to create a barrier between the protected material and the aggressive environment. The barrier can be created by applying different surface protection technologies, and the most common is certainly the application of organic coatings. This is supported by the fact that almost 75% of steel structures are protected in this way. However, it is important to know that the success of this type of protection does not depend only on the quality of the components from which the protective coating is made, nor on the applied system itself, but the protective effect largely depends on the quality of the surface preparation as well as on the quality application of the protective system on the material that is the subject of protection. Depending on the characteristics of the positions to be protected, the ways in which organic coatings are applied are brush, roller, air and airless spraying. The most common argument for choosing one of the mentioned application methods is certainly productivity, but this paper wants to draw attention to the fact that it should not be the only criterion. In addition to the good cohesive properties of the coating and the bond between each applied layer, the adhesive bond between the primer and the surface of the protected material is extremely important. By carrying out experimental tests in which the primer of the same characteristics was applied using different procedures, using the cross-cut method, it was established that there are differences in the achieved adhesion bonds of the primer and the substrate.

**Key words:** corrosion, metal protection, primer coating, adhesion properties, cross-cut method

## 1. Uvod

Razvoj korozivskih mehanizama, bilo kemijskih ili elektrokemijskih, predstavlja veliki problem u svim eksploatacijskim fazama konstrukcijskog materijala [1-3]. Ovisno o sredini u kojoj se materijal nalazi, samim materijalima koji su u kontaktu ili njihovim karakteristikama, drastično se mijenja intenzitet razvoja korozivskih procesa, ali isto tako na osnovu toga se bira i adekvatan način zaštite materijala [1]. Negativan utjecaj razvoja korozivskih mehanizama, kao i proizašli financijski gubici značajno se mogu smanjiti odabirom adekvatne tehnologije površinske zaštite, određene studije su pokazale da je to moguće čak u mjeri i to 35% [4, 5]. Poznato je da se zaštita materijala može bazirati na načelima izmjene unutrašnjih i vanjskih faktora oštećivanja te stvaranju barijere između agresivnih reaktanata iz okoline i šticećenog materijala [6]. Budući je 75% metalnih konstrukcija zaštićeno organskim premazima [7], onda se našla potreba i opravdanost upravo za proučavanjem posljednje spomenutog načela gdje se barijera stvori aplikacijom sustava premaza. Prema namjeni u zaštitnom sustavu premazi se dijele na temeljne, međupremaze i završne premaze. Najveći

dio zaštite od razvoja korozivskih mehanizama, zbog najvećeg udjela prisutnih antikorozivnih pigmentata, karakterističan je za temeljne premaze. No isto tako temeljni premazi moraju se odlikovati dobrom prionjivosti, tj. moraju osigurati dobra adhezijska svojstva s materijalom na kojega se apliciraju [8, 9]. Sama adhezijska svojstva ovise o više faktora, međutim ovdje se naglasak želi staviti na odabrani način aplikacije. Sama kvaliteta komponenti od kojih je premaz izrađen te kvaliteta pripremljene površine također u velikoj mjeri uvjetuju adhezijska svojstva pa se prilikom provedbe eksperimentalnih ispitivanja u ovom radu osiguralo da su ti uvjeti isti za sve promatrane ispitne uzorke. Na taj način osigurano je da izlazne vrijednosti provedenih pokusa, u vidu adhezijskih svojstava, budu u ovisnosti samo o različitim načinima aplikacije.

## 2. Zaštita metala premazima

Zaštita metalnih konstrukcija primjenom organskih premaza je najzastupljenija tehnologija površinske zaštite. Ovisno o komponentama od kojih je isti sačinjen, a pri tome se misli na veziva, otapala, pigmente, punila i aditive, u najvećoj mjeri ovisi i kvaliteta samog zaštitnog učinka istih. Ukoliko se govori o klasifikaciji premaza, tada valja napomenuti kako se podjela može napraviti prema sastavu, namjeni, izgledu, podlogama na koje se nanosi, broju sastojaka koji se miješaju prije nanošenja, ulozi u premaznom sustavu te načinu sušenja [7]. Za provedbu eksperimentalnog dijela ovog rada, svakako je najzanimljivija podjela prema ulozi pojedinog sloja u zaštitnom sustavu apliciranog organskog premaza. Završni premaz stvara primarnu barijeru prema okolišu, međupremaz uz osiguranje otpornosti prema kemikalijama i okolišu osigurava i potrebnu debljinu sustava, a temeljni prema uz stvaranje zaštite velikim udjelom antikorozivnih pigmentata osigurava i jako prijanjanje, tj. dobra adhezijska svojstva sustava [7]. Upravo posljednje spomenuto je i najzanimljivije u okviru ovog rada, jer se želi ukazati kako osim već poznatih čimbenika u vidu kemijskih komponenti te kvalitete pripreme površine i različiti načini aplikacije mogu mijenjati spomenuto svojstvo. Slika 1 prikazuje premazni sustav sa svim prisutnim slojevima i njihovom ulogom.



**Slika 1.** Slojevi u apliciranom sustavu organskog premaza [7]

### 3. Eksperimentalni dio

Kako je prethodno u poglavlju vezanom za zaštitu organskim premazima spomenuto, zaštitni učinak organskih premaza uvelike ovisi o kvaliteti samih komponenti od kojih je isti napravljen. Međutim ne treba zanemari i ostale čimbenike koji mogu osigurati ili pak narušiti očekivanu zaštitnu funkciju. Jednako je važno obratiti i pažnju na pripremu podloge na koju se premazi nanose, jer ukoliko podloga nije adekvatno pripremljena neće se moći ostvariti zadovoljavajuće adhezijske veze s temeljnim slojem i postojanost cijelog sustava bit će upitna. Uz to još značajnu ulogu na ostvarivanje dobrih adhezijskih svojstava između premaza i podloge ima i način aplikacije. U većini slučajeva odabir načina aplikacije gleda se samo kroz produktivnost, odnosno koliko se kvadratnih metara površine može zaštititi u jedinici vremena, međutim upravo provedbom ovih eksperimentalnih ispitivanja želi se skrenuti pažnja da se ne treba voditi samo tim kriterijem. Važno je uočiti kako se različitim postupcima aplikacije jednako tako postižu i različita adhezijska svojstva, odnosno neki načini aplikacije osigurati će postojaniju vezu temeljnog premaza i podloge što će u konačnici osigurati i veću postojanost samog sustava te ostvarivanje očekivanih zaštitnih svojstava.

#### 3.1. Priprema ispitnih uzoraka

Ispitni uzorci izrađeni od materijala S235 koji se koriste za aplikaciju temeljnih premaza, prvo se moraju očisti od nečistoća te se mora stvoriti zadovoljavajuća kvaliteta površine. To se postiže postupkom pjeskarenja. Postupak pjeskarenja je čišćenje metala u kojem abrazivno sredstvo pod pritiskom komprimiranog zraka udara od površinu metala i na taj način ga čisti. Pjeskarenje je najbolja metoda za odstranjivanje velikih debljina produkata korozije, ali i starih premaza. Ovim postupkom ne samo da se čisti površina metala nego se i pogrubljuje, tj. ostvaruje se zadovoljavajuća hrapavost površine. Kvaliteta pripremljene površine mora biti u skladu s kategorijom Sa 2½. Slika 2 prikazuje postupak pjeskarenja ispitnog uzorka.



**Slika 2.** Pjeskarenje ispitnog uzorka

#### 3.2. Aplikacija temeljnog premaza

Za sve načine aplikacije koristi se premaz istih karakteristika i to dvokomponentni epoksidni temeljni premaz (EP INDUSTRIEGRUND HS) i to jednake debljine apliciranog suhog filma premaza. Važno je bilo osigurati jednaka polazna svojstva kako ne bi bilo sporednih utjecaja

zbog kojih bi došlo do odstupanja rezultata. Ovim načinom eventualna razlika u adhezijskim svojstvima biti će rezultat samo različitih postupaka aplikacije koja je izvedena na četiri slijedeća načina:

- a) kistom,
- b) valjkom,
- c) zračnim postupkom,
- d) bezračnim (eng. airless) postupkom.

Oprema za aplikaciju premaza zračnim i bezračnim postupkom je od proizvođača industrijske opreme Graco. Slikama 3 do 6 prikazani su spomenuti načini aplikacije.



**Slika 3.** Aplikacija premaza kistom



**Slika 4.** Aplikacija premaza valjkom



**Slika 5.** Aplikacija premaza zračnim postupkom



**Slika 6.** Aplikacija premaza bezračnim postupkom

### 3.3. Ispitivanje adhezijskih svojstava metodom urezivanja mrežica (cross-cut)

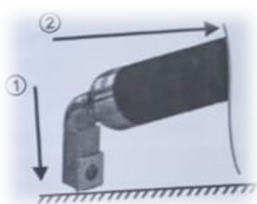
Cross-cut metoda, ili metoda urezivanja mrežica se zasniva na zasijecanju ispitnih površina noževima sa više zubaca kako bi se dobila rešetkasta struktura zasijecanja (horizontalnim i vertikalnim zasijecanjem). Ista se pod povećalom analizira i određuje se kvaliteta adhezije temeljnog premaza u stupnjevima od 1 do 5 po ISO standardu. Oprema za izvođenje postupka (noževi, držač noža, četkica za čišćenje, ljepljiva traka, povećalo) prikazana je na slici 7.



**Slika 7.** Oprema za ispitivanje metodom urezivanja mrežica

Sam postupak ispitivanja izvodi se na slijedeći način:

- učvršćivanje noža,
- postavljanje noža na uzorak, laganim pritiskom povlačiti nož prema operateru u jednom potezu (slika 8), kako bi se napravilo seriju paralelnih zasjekotina otprilike 20 mm dugačku (slika 9),
- na isti način napraviti seriju zasjekotina pod kutom od 90 stupnjeva, time se dobije rešetkasta struktura zasjekotina na uzorku (slika 10),
- četkicom za čišćenje nekoliko puta lagano očetkati u smjeru dijagonala kako bi se odstranile čestice boje (slika 11),
- odrezati komad trake duljine otprilike 75 mm i lagano prstom zalijepiti na rešetku (slika 12),
- unutar pet minuta od postavljanja trake, odstraniti traku povlačenjem u jednom potezu, brzinom 0,5 do 1 sekunde pod kutom od 60 stupnjeva u odnosu na površinu (slika 13).



**Slika 8.** Zasijecanje uzorka nožem [10]



**Slika 9.** Prikaz zasjekotina na uzorku [10]



**Slika 10.** Rešetkasta struktura zasjekotina [10]



**Slika 11.** Čišćenje ispitnog uzorka [10]



**Slika 12.** Lijepljenje trake [10]




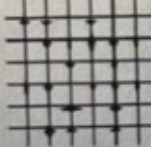

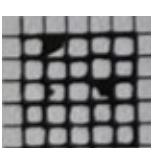
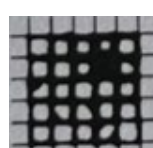
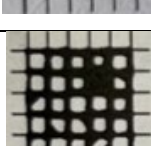
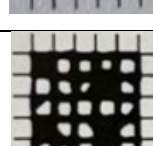
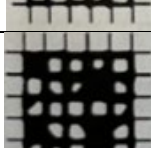
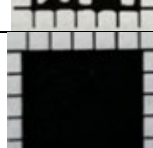


**Slika 13.** Odljepljivanje trake [10]



Iza toga slijedi promatranje mreže pod povećalom i dobrim osvjetljenjem te usporedba postignute površine s tablicom (tablica 1) u kojoj je definiran način valorizacije, tj. ocjenjivanja ispitne površine.

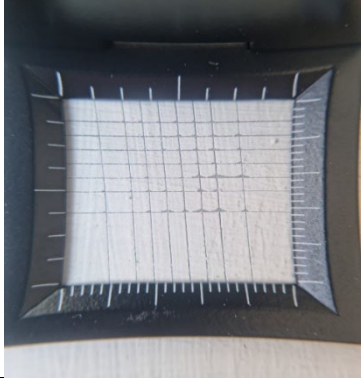
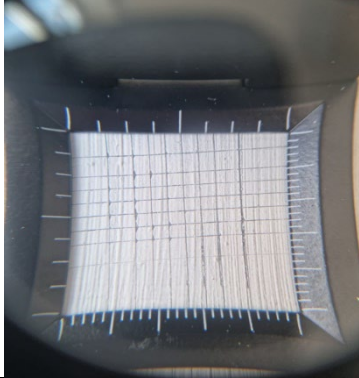
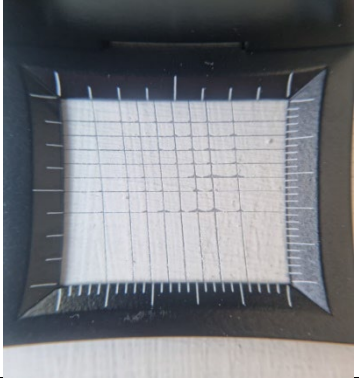
**Tablica 1.** Utvrđivanje rezultata na pojedinačnim ispitnim uzorcima [10]

Primjer izgleda		Opis	Klasifikacija
Minimalno uklanjanje	Maksimalno uklanjanje		ISO
		Rubovi rezova su potpuno glatki, niti jedan od kvadrata rešetke nije odvojen.	GT0
		Odvajanje ljuskica premaza na sjecištima rezova. Površina oštećenog reza nije veća od 5% zahvaćene površine.	GT1
		Premaz se ljuštio duž rubova i/ili na sjecištima posjekotina. Zahvaćeno je područje veće od 5%, ali ne veće od 15%.	GT2
		Premaz se ljuštio duž rubova rezova djelomično ili u cijelosti u velikim trakama i/ili se ljuštio djelomično ili u cijelosti na različitim dijelovima kvadrata. Zahvaćeno je područje veće od 15%, ali ne veće od 35%.	GT3
		Premaz se ljuštio duž rubova rezova u velikim vrpcama i/ili su se neki kvadrati djelomično ili potpuno odvojili. Zahvaćeno je područje veće od 35%, ali ne veće od 65%.	GT4
		Svaki stupanj ljuskanja koji se ne može klasificirati čak ni klasifikacijom 4	GT5

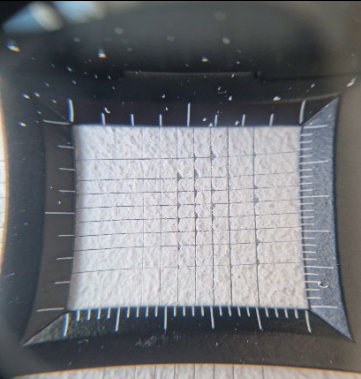
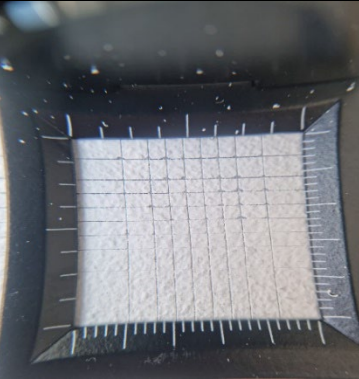
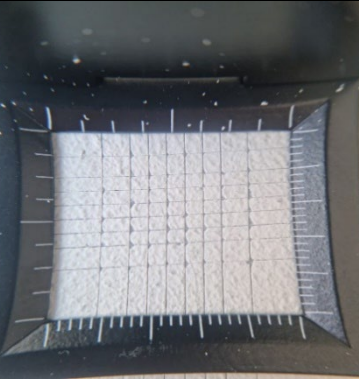
#### 3.4. Analiza rezultata provedenih na pojedinačnim uzorcima

Utvrđivanje kvalitete adhezijskih svojstava za svaki od promatranih načina aplikacije provedeno je na tri uzorka. Za svaki od uzoraka u narednim tablicama od 2 do 5 prikazane se pojedinačne klasifikacije i ocjene ispitne površine.

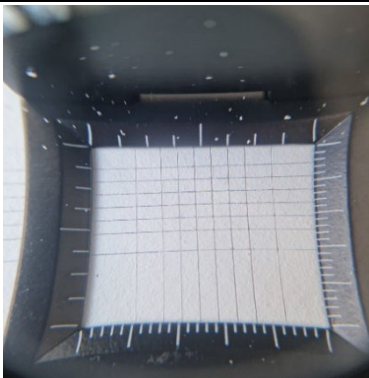
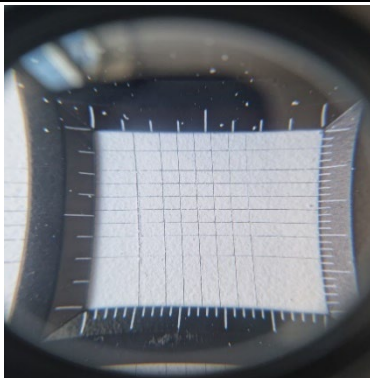
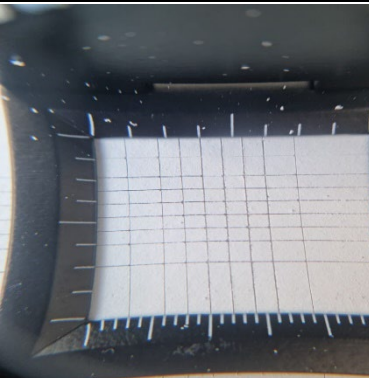
**Tablica 2.** Rezultati ispitivanja adhezijskih svojstava premaza apliciranog kistom

Uzorak 1.1	Uzorak 1.2	Uzorak 1.3
		
GT2	GT2	GT1

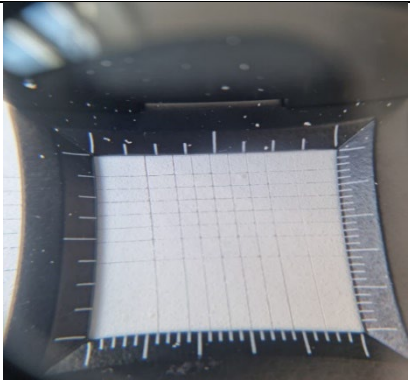
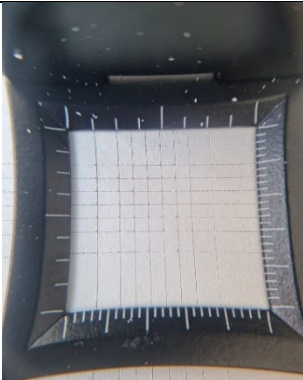
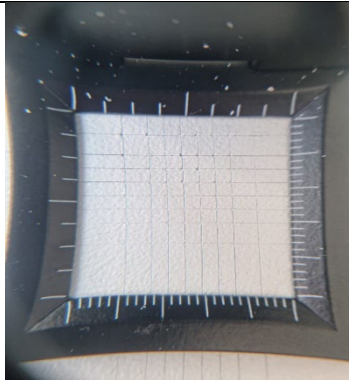
**Tablica 3.** Rezultati ispitivanja adhezijskih svojstava premaza apliciranog valjkom

Uzorak 2.1	Uzorak 2.2	Uzorak 2.3
		
GT2	GT1	GT2

**Tablica 4.** Rezultati ispitivanja adhezijskih svojstava premaza apliciranog zračnim postupkom

Uzorak 3.1	Uzorak 3.2	Uzorak 3.3
		
GT0	GT0	GT1

**Tablica 5.** Rezultati ispitivanja adhezijskih svojstava premaza apliciranog bezračnim postupkom

Uzorak 4.1	Uzorak 4.2	Uzorak 4.3
		
GT1	GT1	GT1

### 3.5. Analiza rezultata

Analizom rezultata adhezijskih svojstava postignutih različitim postupcima aplikacije vidljivo je kako ima razlike u izlaznim vrijednostima. Pri tumačenju rezultata, važno je znati kako se kao prihvatljiva adhezijska svojstva smatraju samo ona koja su ostvarila ocjenu GT0 ili GT1. U skladu s tim, kod aplikacije premaza kistom vidljivo je kako dva od tri uzorka ne zadovoljavaju postavljeni kriterij. Sličan rezultat dobiven je i na uzorcima na koje se premaz nanosio valjkom, gdje je također jedan rezultat prihvatljiv. Vidljivo je kako su lošija adhezijska svojstva ostvarena ovim postupcima aplikacije, ali budući se ovim načinima ostvaruje ujedno i najmanja produktivnost, u realnim industrijskim uvjetima ti postupci se koriste za minimalne zahvate kao što su popravci, flekanje, zaštita nedostupnih mjesta i slično. Što se tiče uzoraka koji su zaštićeni premazom apliciranim zračnim i bezračnim prskanjem, prema spomenutom kriteriju prihvatljivosti, vidljivo je kako svi zadovoljavaju. Iz toga proizlazi zaključak da nije samo produktivnost mjerilo na osnovu kojega se ti postupci trebaju birati nego i adhezijska svojstva koja se njima mogu ostvariti. Razlog tome djelomično leži i u radnim parametrima te većim radnim tlakovima kojima se premaz u vidu sitnijih čestica bolje rasprostranjuje po prethodno pripremljenoj površini. Neravnine postignute pjeskarenjem na taj način se bolje i ravnomjernije popunjavaju i ostvaruje se bolja veza premaza i površine šticećenog materijala.

## 4. Zaključak

Zbog velikog problema kojega predstavlja razvoj korozivskih mehanizama, te time povezanih otkaza i financijskih gubitaka, važno je odabrati adekvatan sustav površinske zaštite. Jedna od raspoloživih tehnologija je svakako i zaštita metala primjenom organskih premaza. Sam premaz ima određene zaštitne karakteristike koje su uvjetovane komponentama od kojih je sačinjen, međutim funkcionalna zaštita ovisi o još nekim parametrima. Jedan od njih je kvalitetna priprema površine, dok je drugi i odabir sustava aplikacije sa optimalnim radnim parametrima. Najčešće se u industriji premazi apliciraju kistom, valjkom te zračnim ili bezračnim postupkom. U većini slučajeva odabir jednog od spomenutih zasniva se na produktivnosti koju isti pružaju, međutim ovim radom željela se skrenuti pažnja na još jednu



karakteristiku. Bitno je shvatiti kako se zbog određenih parametara pojedinih načina aplikacije mogu razlikovati ostvarena adhezijska svojstva apliciranog premaza i štíćene podloge. Tako je eksperimentalnim dijelom rada ukazano na činjenicu kako će zračno i bezračno prskanje zbog boljeg razlijevanja premaza te popunjavanja neravnina na prethodno pripremljenoj površini ostvariti jaču vezu i bolja adhezijska svojstva. Isto tako, aplikacija kistom i valjkom zbog lošijih karakteristika u vidu adhezijskih svojstava, sve ako se i zanemari puno manja produktivnost, treba ostati u primjeni samo za manje popravke, nedostupna mjesta i slične zahvate.

## 5. Literatura

- [1] L. F. 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 // *International 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 M. 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] Esih, Ivan; Dugi Zvonimir. Tehnologija zaštite od korozije. Zagreb, 1989.
- [7] Juraga, Ivan; Alar, Vesna; Stojanović, Ivan. Korozija i zaštita premazima. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [8] Mariappan, T.; Kamble, A.; Naik S. M. An investigation of primer adhesion and topcoat compatibility on the waterborne intumescent coating to structural steel // *Progress in Organic Coatings*, 131(2019); 371-377
- [9] Puspitasari, W. C.; Ahmad, F.; Ullah, S.; Hussain, P.; Megat-Yusoff, P. S. M.; Masset P. J. The study of adhesion between steel substrate, primer, and char of intumescent fire retardant coating // *Progress in organic coating*, 127(2019); 181-193
- [10] Elcometer 107: Cross Hatch Adhesion tester. User Guide.

## Eco-design of steel structures

Gy. Vasvári<sup>1</sup>, F. Orbán<sup>1,\*</sup>, T. Zsebe<sup>1</sup>, Cs. Dávid<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology,  
University of Pécs, Hungary

\* Corresponding Author. E-mail: [orban.ferenc@mik.pte.hu](mailto:orban.ferenc@mik.pte.hu)

### Abstract

When designing steel structures, it is important to take into account some basic principles of product design. One of these principles is to use as little material as possible. Weight reduction goes hand in hand with a reduction in environmental impact, because fewer intermediate products need to be produced. Another principle is recycling and repurposing. These options must be considered right from the design stage. The recycling of steel has already been addressed, since, for example, casting provides raw material again. However, a better option is reuse, so it is advisable to design structures that are easy to disassemble. When establishing connections, a bolted connection is recommended instead of a welded one. In this article we will give an example of planning for minimal weight. First, the design of a simply supported planar truss is shown, and then the results of a previously designed pressed column are described. When sizing the truss support, the sizing conditions are stress limitations and deformation. We choose volume as the objective function. The optimum search was performed using the TDO program developed by Snyman. In the case of pressed columns, significant weight reduction can be achieved by choosing multiple sections instead of one for cross-section. We connect the sections with battens. The connection of the battens can be welded or bolted. In the article we plan to replace the previous welded connection with a bolted one. The formation of a joint on the truss support is planned by welding and bolt connection. We perform a cost calculation for each of the two cases. The cost of production is lower in the bolted case.

**Keywords:** uniplanar truss, optimum design, U-profiles with battens, welded and bolted joints

### 1. Introduction

The main principles of eco-conscious product design include using as little material as possible for the planned product, extending the planned service life as much as possible, and thinking about recycling during the design phase. Material consumption can be reduced if we design a structure that is fully utilized for stress, but this is not always advantageous due to production constraints.

When designing structures, it is necessary to satisfy the sizing conditions and aim to keep the weight of the structure to a minimum. The economical production of the structure may be a requirement, in which case the goal is to minimize costs.

For steel structures, the life of the structure can be extended by various surface treatments. During recycling, the structure is dismantled, so it is important to design bolted connections instead of welded connections. In industries where products have a shorter lifespan and the manufacturer has to buy back the used product, planning for disassembly is of great importance. There are many articles in the literature comparing welded and bolted connections [1,5].

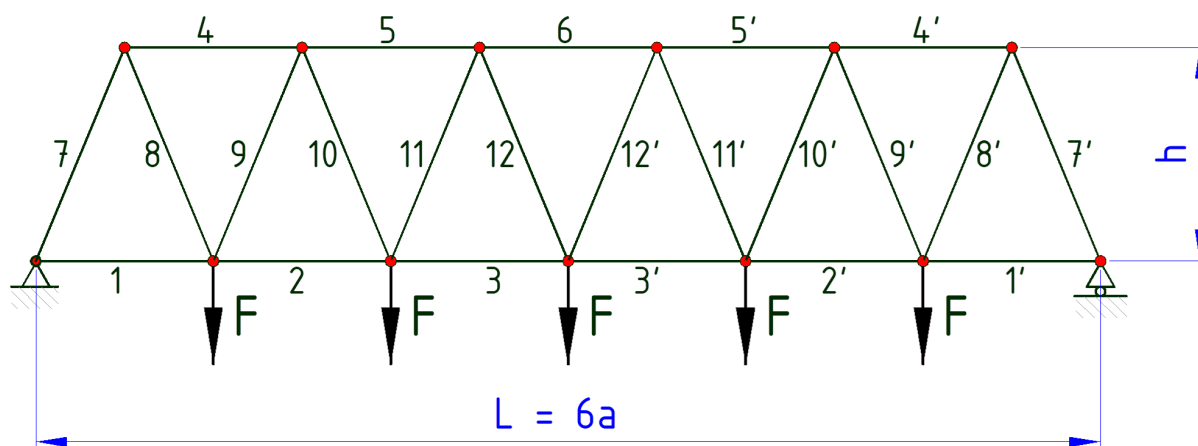
Built-up members are used in many structures; these are composed of several solid sections connected by lacing or battening.

As a rule, these are economical structures, because less material is required than for a single section. The connection of the battens or lacing can be done by welding or screwing. An example of flat battens with screws is given in this paper.

Further calculations are made for the formation of the node of the truss support in the case of welding and screwing.

## 2. Optimum design of uniplanar truss

The optimum design of the planar truss with parallel chords support, outlined in Figure 1, is shown through a numerical example. The support is statically determinate and its load is carried out at the nodes.



**Figure 1.** Simply supported uniplanar truss with parallel chords

The aim of the present study is to show the minimum volume optimum of a truss and solve the design problem subject to a displacement constraint  $w_{adm}=L/750$  [6].

In the case of stress constraints, the tension rods have a maximum stress of 190 MPa and the compression rods have a maximum stress of 160 MPa.

Numerical data:  $F = 80$  kN ,  $a = 2$  m,  $h=2.4$  m; Elastic modulus  $E = 210\ 000$  MPa

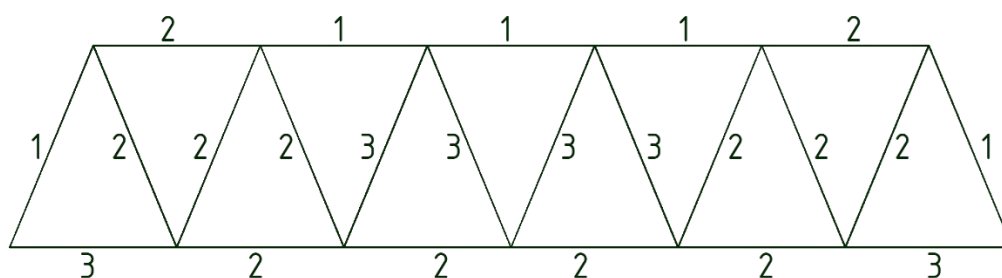
The member of forces determined assuming pinned joints noding centre lines.

**Table 1.** Member forces

i	S <sub>i</sub> kN		l <sub>i</sub> m
	+	-	
1	83.2		2
2	216		2
3	283.2		2
4		166.4	2
5		266.4	2
6		300	2
7		216	2.6
8	216		2.6
9		130	2.6
10	130		2.6
11		43.68	2.6
12	43.68		2.6

The rods are manufactured from three sections for easier production. The areas of the cross-sections are: A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>.

Member groups are as follows: 1) chords for compression, 2) chords for tension, 3) bracing members ( Figure 2.).



**Figure 2.** Member groups of investigated truss

The structural volume is given by V.

The objective function:

$$\frac{V}{2} = 560 \cdot A_1 + 860 \cdot A_2 + 1240 \cdot A_3 \quad [cm^3] \quad (1)$$

Stress constraints:

$$A_1 \geq \frac{S_6}{\sigma_{adm}} = \frac{300}{16} = 18.75 \text{ cm}^2; A_2 \geq 14.9 \text{ cm}^2; A_3 \geq 8.12 \text{ cm}^2 \quad (2)$$

The displacement constraint is formulated as

$$W = \frac{S_i \cdot s_i \cdot l_i}{A_i \cdot E} \leq W_{adm} \quad (3)$$

$S_i$  is the rod force,  $s_i$  is the rod force from the unit force acting at the midspan.

$$\frac{11\,209}{A_1} + \frac{130\,076}{A_2} + \frac{46\,078}{A_3} \leq \frac{1.6}{2} \cdot 21000 = 16800 \quad (4)$$

(3) Solution for the minimization problem can be found by using mathematical methods.

TDO uses gradient-based optimization methods developed at the University of Pretoria [2].

The mathematical optimization problem can be stated as follows:

Find  $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , that minimizes  $f(x)$

subject to the constraints

$g_j(x)=0, j=1,2,\dots,m$  and  $h_j(x)=0, j=1,2,\dots,r$

where  $f(x)$ ,  $g_j(x)$  and  $h_j(x)$  are scalar functions of the variables  $x$ .

The function  $f$  is called the objective function and  $g_j$  and  $h_j$  are respectively the inequality and equality constraint functions.

In this case,  $x_1 = A_1$ ;  $x_2 = A_2$ ;  $x_3 = A_3$

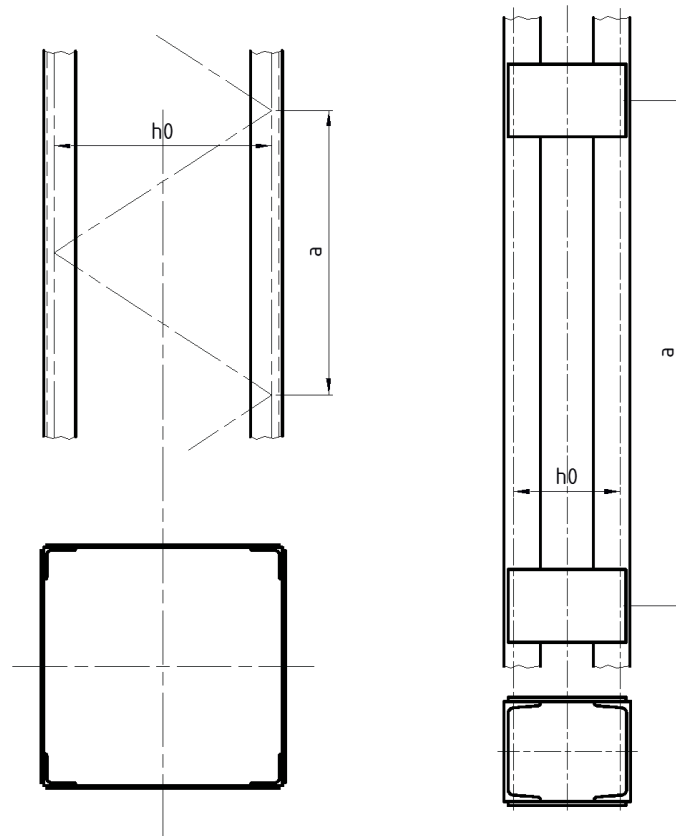
The optimized results:

$$A_1 = 21.95 \text{ cm}^2; A_2 = 19 \text{ cm}^2; A_3 = 9.45 \text{ cm}^2$$

The displacement constraint was active.

### 3. Centrally compressed columns

Built-up members are used in many structures, such as compression members of trusses or supporting columns. They are composed of two rolled U-sections or four rolled angles. The distance between them is fixed by lacing or battening (Figure 3).



**Figure 3.** Compressed columns

In a previous article [3], we determined the main dimensions of the column with optimal design, in addition to the following data:

$N_{ed} = 700 \text{ kN}$  ;  $L = 10 \text{ m}$ ; S235(W.Nr. 1.0038)

Optimum values:

four rolled angles with lacing

L70x70x7,  $h_0 = 510 \text{ mm}$ ;  $a = 625 \text{ mm}$ ; the cross-sectional area of a lacing bar  $90 \text{ mm}^2$ ;  $V = 4449 \text{ dm}^3$ ,

two battened U profiles:

U 220;  $h_0 = 260$ ;  $a = 1111$  mm; size of batten 190x9;  $V = 7854$  dm<sup>3</sup>

The compressive 70x70x7 angles with lacing have the smallest volume.

Comparing these results with a CHS section  $\varnothing 323.9 \times 7.1$  ;  $V = 7070$  dm<sup>3</sup>,

we can say that a 37% mass saving can be achieved by using such built-up members instead of CHS rods.

In the previous article, the lattice bars and batten were welded to the angle and U sections.

#### 4. Welded and bolted batten joints

U sections – batten connection can be constructed as welded or bolted ones (Figure 4).

Fillet welds values:  $a_w = 6$  mm;  $l = 190$  mm

The shearing force acting on the half batten:

$$V_w = V_{ed} \cdot \frac{a}{h_0} = 70 \text{ kN} \quad (5)$$

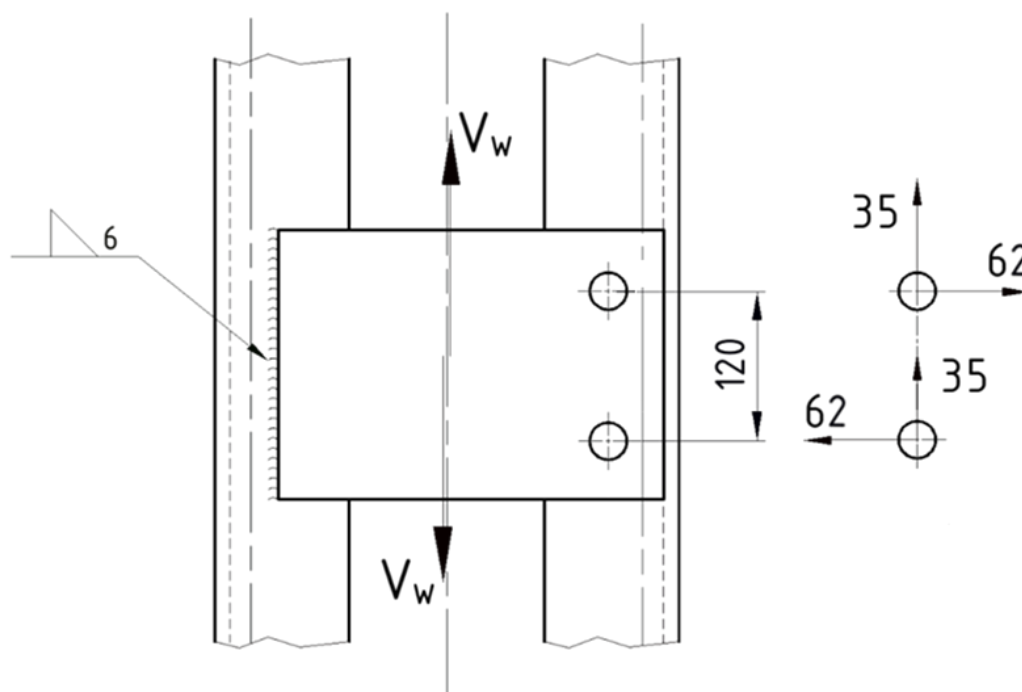


Figure 4. Welded and bolted joints



Design of the fillet welds connections [6]:

$$\tau_{II} = \frac{70 \cdot 10^3}{190 \cdot 6} = 61.4 \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{70 \cdot 120}{\sqrt{2} \cdot \frac{0.6 \cdot 19^2}{6}} = 165 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{165^2 + 3(165^2 + 61.4^2)} = 346.7 \text{ MPa} < 360 \text{ MPa} \quad (8)$$

Bolted connection: two 8.8 grade M20 bolts

Maximum force on the screws:

$$F_{max} = \sqrt{62^2 + 35^2} = 71.2 \text{ kN} \quad (9)$$

Shearing resistance:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot 800 \cdot 245}{1.25} = 94 \text{ kN} > F_{max} \quad (10)$$

## 5. Design of welded and bolted joints for truss

We design one node of the truss support in Figure 1. The inner forces are shown in Figure 5.

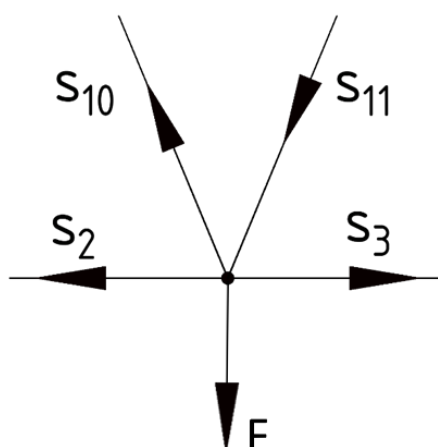


Figure 5. Internal forces

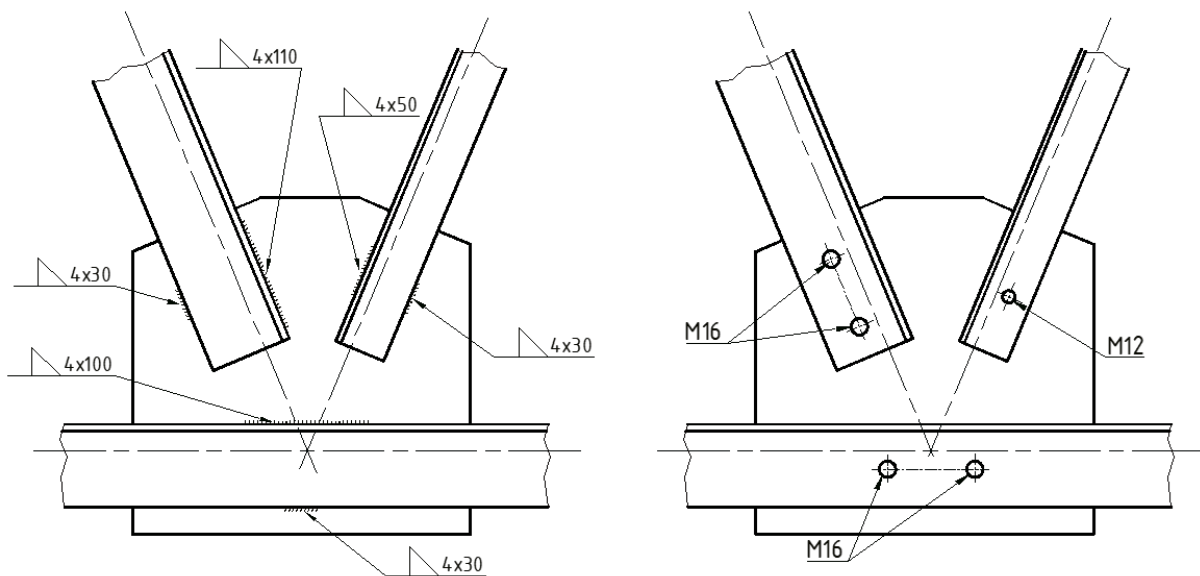


Rod sections:

S<sub>10</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>      2 pieces      L 80x80x7

S<sub>11</sub>                2 pieces      L 50x50x5

Required weld size and screw diameter (Figure 6).



**Figure 6.** Weld size and screw diameter

## 6. Cost calculation

When the costs of welded and bolted connections are compared, the cost calculation may include the cost of material, assembly, the different fabrication costs such as welding, surface preparation etc.

The cost of materials:

$$K_m = k_m \cdot \rho \cdot V \quad (11)$$

The fabrication cost in general:

$$K_f = k_f (T_1 + T_2 + T_3) \quad (12)$$

where  $K_f$  [\$] is the fabrication cost,  $k_f$  [\$/min] is the corresponding fabrication cost factor,  $T_i$  [min] is the production time.

Calculation of the times of preparation, assembly and tacking:

$$T_1 = C_1 \cdot \theta \cdot \sqrt{\kappa \cdot \rho \cdot V} = 20.95 \text{ min} \quad (13)$$

where  $C_1$  is a parameter depending on the welding technology,  $\theta$  is the difficulty factor,  $\kappa$  is the number of elements to be assembled.

Calculation of real welding time:

$$T_2 + T_3 = 1.3 \sum C_{2i} \cdot a_w^2 \cdot L_w = 7.5 \text{ min} \quad (14)$$

where  $C_{2i}$  is a constant for different welding technologies,  $a_{wi}$  is weld size, and  $L_{wi}$  is weld length.

The total cost:

$$K=28.45 \text{ \$, if } k_f=1 \text{ \$/min}$$

Cost of bolted connections:

- cost of cutting and materials
- drill holes

Cutting of angles is roughly 8% of the material cost:

$$K=3.9 \text{ \$}$$

cost of drilling :

$$K=0.38 \text{ \$/pcs}$$

The cost of screws depends on several factors, here we use the following data:

cost of screws

$$K=0.5 \text{ \$/pcs}$$

The total cost:

$$K=5 \cdot 0.5 + 15 \cdot 0.38 + 3.9 = 21.78 \text{ \$}$$

The bolted connection is about 30% cheaper than the welded one.

## 7. Conclusion

When structural elements are optimized for weight or cost, less steel is used. Since weight is directly proportional to the global environmental impact, reducing weight results in a lower environmental impact. We demonstrated the sizing of a truss support when it was introduced to minimize volume. For reuse, it is better to make a bolted connection instead of a welded one. We have shown in some examples that it is possible to design a bolted connection instead of a welded connection. The article aims to build a competitive structure by combining the goals of reuse and optimization [4].

## 8. References

- [1] Farkas, J., Jármai, K.: *Economic Design of Metal Structures*. Millpress 2003 Rotterdam Netherlands
- [2] Snyman, J.A., Wilke, D.N.: *Practical Mathematical Optimization*, Springer 2018
- [3] Orbán, F., Farkas, J.: *Optimum Design of Steel Built-up Compression Members. Design Fabrication and Economy of Metal Structures*. International Conference Proceedings 2013, Miskolc, Hungary
- [4] Norman, Donald, A.: *Design for a Better World: Meaningful, Sustainable, Humanity Centered*. Cambridge, MA, MA: The MIT Press 2023
- [5] Farkas, J., Jármai, K., Visser-Uys, P.: *Cost comparison of bolted and welded frame joints*, Copenhagen, 2002. doi:10.1007/bf03266373
- [6] Eurocode 3: *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, CEN (2005)



# Manufacturing Cast Parts Using Additive Technology-Based Prototype Patterns

Á. Vér<sup>2</sup>, Gy. Vasvári<sup>1\*</sup>, D. Csonka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs, Hungary

<sup>2</sup>Volánbusz Zrt. - Regional technical expert

\*Corresponding Author. E-mail: [vasvari.gyula@mik.pte.hu](mailto:vasvari.gyula@mik.pte.hu)

## Abstract

The advancement in additive manufacturing (AM) has revolutionized traditional manufacturing processes, particularly in the production of complex cast parts. This paper discusses the manufacturing of cast parts using a prototype pattern produced through additive technology. The process involves creating a mould using 3D printed patterns, detailing each step from pattern creation to final casting. This method offers significant advantages in terms of flexibility, precision, and material savings

**Keywords:** Additive Manufacturing (AM), 3D Printing, Prototype Patterns, Casting Fused Deposition Modeling (FDM), Aluminum Casting

## 1. Introduction

Additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, has become an indispensable tool in modern manufacturing. This study focuses on utilizing AM to create prototype patterns for aluminium casting, providing a detailed overview of the process, including the benefits and challenges associated with this approach. The aim is to demonstrate how AM can streamline the production of complex parts, reduce lead times, and improve the overall quality of the cast components [1].

The use of AM in manufacturing is driven by its ability to produce intricate designs that would be otherwise impossible or highly cost-prohibitive with conventional methods. According to recent studies, AM significantly reduces material waste, minimizes lead times, and enhances design flexibility, making it an ideal choice for prototyping and low-volume production runs [1-4].

One of the key benefits of AM is its layer-by-layer fabrication approach, which allows for the creation of highly detailed and customized parts. This capability is particularly advantageous in the context of casting, where precise and repeatable patterns are crucial for achieving high-quality final products. Moreover, the integration of AM with traditional casting processes can streamline production workflows, reduce tooling costs, and improve overall product performance [1].

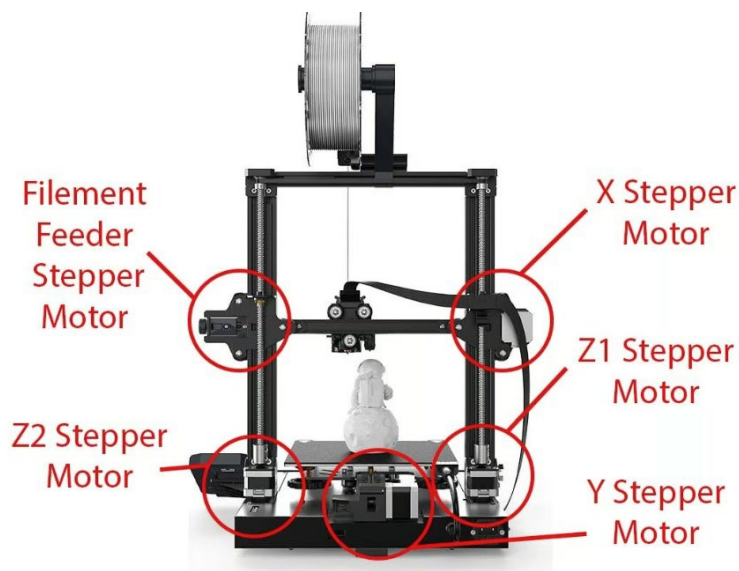
Despite its numerous benefits, the adoption of AM in casting is not without its challenges. Issues such as surface finish quality, post-processing requirements, and the mechanical properties of printed materials must be carefully managed to ensure the success of the casting process. Additionally, the choice of materials for 3D printing, such as PLA (Polylactic Acid), plays a critical role in determining the suitability of the prototype pattern for mold making and subsequent casting operations [1-4].

To further substantiate the benefits and address the challenges of using AM for casting, this paper explores recent advancements in the field, drawing on a variety of scientific sources and practical case studies. By examining the interplay between 3D printing technologies and traditional casting methods, we aim to provide valuable insights into optimizing the manufacturing process and achieving superior cast parts [7-9].

## 2. Methods

### 2.1 The Additive Manufacturing Process

Additive manufacturing involves building objects layer by layer based on digital models. The primary material used for the prototype pattern in this study was PLA (polylactic acid), chosen for its ease of printing and sufficient structural integrity for mould making [1].



**Figure 1.** Structure of the Fused Deposition Modeling (FDM) machine [5]



Key parameters for the 3D printing process included:

Casting pattern printing data:

- Material: PLA
- Infill pattern: Grid
- Infill density: 40%
- Printing speed: 80 mm/s
- Bed temperature: 60°C

Core box printing data:

- Material: PLA
- Infill pattern: Grid
- Infill density: 50%
- Printing speed: 80 mm/s
- Bed temperature: 60°C

The prototype was printed using Fused Deposition Modelling (FDM) technology, which builds the object by depositing molten material in layers. (Figure 1)



**Figure 2.** PLA filaments in different colours [6]

The design features a highly durable cast aluminium fishing rod holder for tournament fishing, which is adjustable in a number of ways. Furthermore, a big advantage of FDM technology is the wide range of PLA filaments (Figure 2) available for printing. The casting was produced by sand moulding. The workpiece had no allowable lateral distortion at the clamping prism location, so a core had to be made there. I also used 3D printing technology to make the core, in this case a split core box.

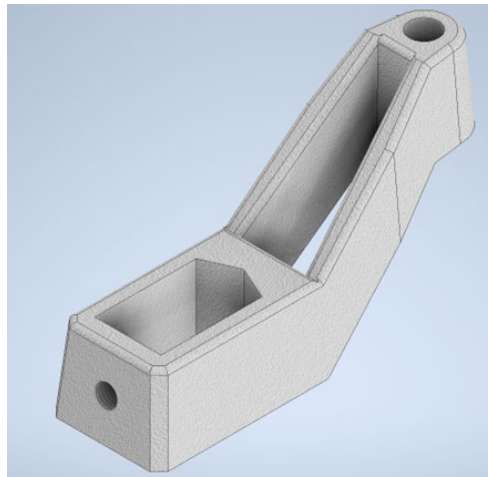
A big advantage of 3D printing technology is that it is extremely easy to create the right conditions for mouldability. It was important, for example, to create the side slope so that the moulding pattern could be removed without damaging the mould, and I was able to do



this easily in the design software. It is also important to take into account the shrinkage of aluminium, which is significant compared to steel. To get the final casting size right, it was sufficient to increase the size of the workpiece in the design software by the shrinkage percentage given in the material quality [7-9].

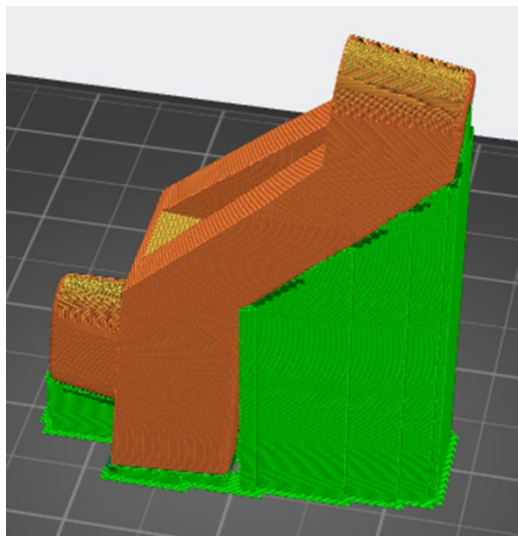
The 3D manufacturing process consists of distinct parts, which are 3D modelling, slicing, 3D printing and post-processing.

Modelling is the process of creating a digital model of the object represented by mathematical formulae. This can be achieved using special design software or by scanning. The result is usually a file with an .stl or .obj extension. The most common format is STL, identified by the word STereoLithography.



**Figure 3.** 3D model

Slicing is the next step, also known as pre-production. This is the process of slicing the object into layers. Slicing is done using a slicing program, which in most cases comes with the printer. One of the most popular of these programs is Cura. The resulting file format has a .gcode extension which is suitable for running the 3D printer. During slicing, the printer is parameterised, the different speeds, the type of filament used, the temperature of the object table, the type and the percentage of infill if the workpiece is not solid, and a number of other parameters are entered here, and supports are inserted and removed after printing. The FDM printer lays down the fused filament layer by layer according to the planes created by many layers of water-jet engraving.



**Figure 4.** Model slicing

Once the 3D model (Figure 3) and the slicing (Figure 4) are done, the gcode file is loaded into the printer, and after calibrating the printer, printing can begin. It is a good idea to monitor the first few layers as this is often the time when problems with the deposition and filament feed are detected.

The final step is to carry out the finishing work, which most often involves the removal of supports and excess material. In industrial applications, additional treatment may be necessary, such as surface treatment or improving the smoothness of the surface.

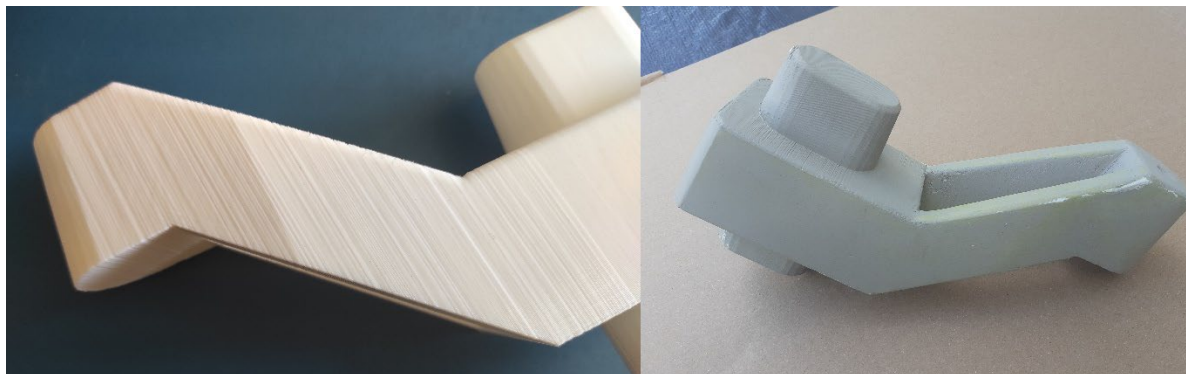
## 2.2. Mould making and casting

Once the prototype had been printed, it was used to create the mould for casting. The process involved several key steps:

### 2.2.1. Surface preparation

The printed sample needed surface finishing to ensure a completely smooth surface. As the printed part is difficult to sand, spray putty was applied in two layers as shown in Figure 5. After sanding the first layer, the second layer was applied. The second layer was gradually sanded with progressively finer grit sandpaper (P120-P1000 wet sander) to achieve the final finish [7-9].

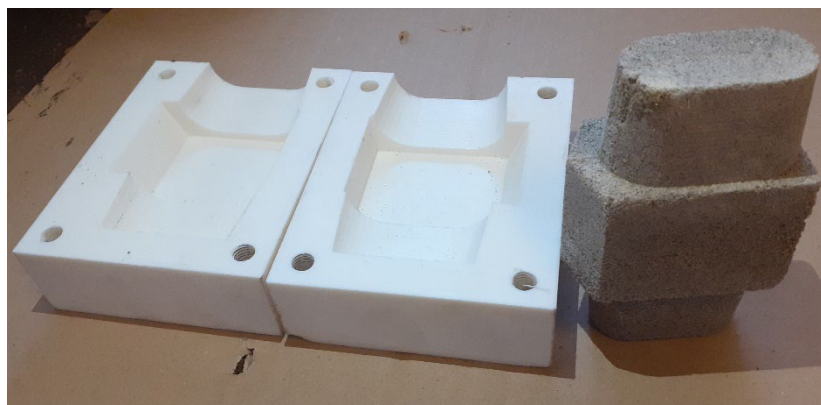




**Figure 5.** Surface Preparation

### 2.2.2. Core preparation

After assembly, the core box was filled with a mixture of sand and Carbophen 9026 as shown in Figure 6, thoroughly compacted and solidified with CO<sub>2</sub>. This is inserted into the core during sand moulding.



**Figure 6.** Preparing core

### 2.2.3. Mould assembly

The assembly steps of the mould assembly are shown in Figure 7. The bottom half is mounted on a wooden board so that the moulding box can be turned over after sand has been compacted into the mould. The moulding pattern with the core mark is placed on this wooden base. Mould release powder is applied to the pattern, fine sand is sprinkled over the pattern using a grate, and the moulding sand mixture is alternately added and compacted until the moulding half of the box is full. The top is then smoothed, and the cabinet is inverted into a thin bed of sand after which the moulding tools are used to manually form the dividing plane. The sand is smoothed out and compacted with minimal pressure so

that when the porous sand is removed, the dividing plane is not damaged. After the mould surface has been cleaned, it is coated with mould release powder. The top part of the mould is then placed on top of the moulding, which is held in position by the alignment pins. The inlet and the supply duct are also formed. Again, the mould is formed as described above. After the mould halves have been separated, the cut-out is made. In addition, the upper half of the mould is pierced at the core mark using an air vent to allow excess gases to escape. Once all this is done, the moulding pattern is removed after a small tapping. The resulting free edges were again gently wetted, and the core was then inserted into the formed core mark [7-9].



**Figure 7.** Mould assembly

#### 2.2.4. Casting Process

Once the mould was prepared, molten metal was poured into it. Aluminium was chosen for its favourable casting properties and mechanical performance. The mould was designed with appropriate gating systems to ensure smooth metal flow and minimise defects [7-8].

### 3. Results and Discussion

The use of AM to produce prototype patterns proved highly effective in producing complex geometries that would be challenging using traditional methods. Key observations from the process included:

- **Accuracy:** The dimensional accuracy of the 3D printed patterns was maintained throughout the casting process, resulting in high quality cast parts.
- **Material efficiency:** The infill patterns used in the 3D printing process reduced material consumption without compromising the strength of the prototype .
- **Surface finish:** Initial surface imperfections on the printed patterns were effectively mitigated through post-processing, ensuring a smooth mould surface and a high quality cast part.

Challenges encountered included the need for extensive post-processing of the printed patterns and the optimization of mould packing to prevent defects in the final cast parts [9].

### 4. Conclusions

Integrating additive manufacturing into the production of prototype patterns for casting offers substantial benefits in terms of flexibility, precision, and efficiency. While challenges such as surface finish and mould packing remain, the overall advantages make this approach highly viable for modern manufacturing environments. Further research into material properties and printing techniques could improve the process, leading to even greater adoption of AM in traditional manufacturing sectors.

### 5. References

- [1] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer.
- [2] Wohlers, T., & Caffrey, T. (2015). Wohlers Report 2015: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates.
- [3] Campbell, I., Bourell, D., & Gibson, I. (2012). Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), 255-258.
- [4] Vaezi, M., Seitz, H., & Yang, S. (2013). A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1721-1754.
- [5] All3DP <https://all3dp.com/2/3d-printer-stepper-motor-what-to-consider-and-which-to-choose-2/> (accessed 20 April 2024)
- [6] 3Dnyomtass <https://3dnyomtass.hu/blog/legjobb-pla-filamentek/> (accessed 20 April 2024)
- [7] Bak, András; Öntő szakmai ismeret, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1990.
- [8] Vörös, Árpád; Öntészet, Akadémiai Kiadó, Budapest 1978.
- [9] Huszár István: Tárgyasult ötletek 3D nyomtatás és tervezés, BBS-INFO Kft., Budapest 2021.

# Continuous wave and femtosecond laser induced hydrogen decomposition

B. Kurilla<sup>1,\*</sup>, Gy. Vasvári<sup>1</sup>, D. Csonka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Pécs, Faculty of Engineering and Information Technology, Hungary

\* Corresponding Author. E-mail: kurilla.boldizsar@mik.pte.hu

## Abstract

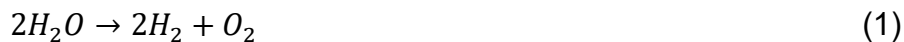
A new method for generating hydrogen from water using a continuous wave infrared laser diode to irradiate a graphene scaffold immersed in a solution is reported. Hydrogen production became extremely efficient when NaCl was added to the water. The efficiency of hydrogen production increased exponentially with the laser power. It was observed that hydrogen production was highly efficient when the graphene foam emitted intense white light upon laser irradiation. The mechanism behind the laser-induced dissociation of water is discussed. It was found that hydrogen production was exceptionally high, around 80%, accompanied by minor emissions of O<sub>2</sub>, CO, and CO<sub>2</sub> gases. It has been investigated yet unexplored method of water splitting by femtosecond laser pulses focused into a quartz cell containing ultra-purified water. As a result of plasma-induced radical reactions, the formation of stable products including molecular H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> was identified and quantified as a function of irradiation time, repetition rate and pulse energies up to 1 mJ. Considering the proposed solution, the anticipated energy efficiency of hydrogen production, at 0.4 g of H<sub>2</sub>/kWh, was found to be similar to that of other plasma methods for generating hydrogen.

**Keywords:** Hydrogen generation, laser irradiation, white light emission, femtosecond laser pulses

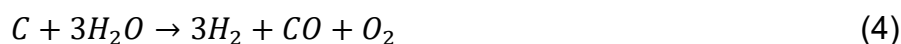
## 1. Introduction

Hydrogen production has gained significant importance recently due to the demand for green energy and the need to reduce CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel combustion. Consequently, the global scientific community is diligently researching various methods to produce hydrogen, including biomass, oil or methane reforming, biological sources, and coal gasification [1-16]. Notably, water electrolysis stands out as the most efficient method for large-scale hydrogen production in carbon-free energy systems [17-21]. Based on the type of electrolyte and operating conditions, four types of electrolysis are identified: polymer electrolyte membrane (PEM) water electrolysis [22,23], solid oxide electrolysis [24,25], microbial electrolysis cells [26,27], and alkaline water electrolysis [28,29]. Additionally, producing hydrogen from water and hydrocarbon liquids using a pulsed laser has been explored in several studies [30-36].

The splitting of water by electrolysis is related to the following formula [1]:



Originally Akimoto et al. [31] discussed the generation of hydrogen from water and carbon by laser excitation. The interaction of water with carbon gives access to the synthesis of carbon oxide, carbon dioxide and oxygen, according to the following steps [1]:



Wieslaw et.al [1] have observed in their earlier experiments with methanol and ethanol that the efficient generation of hydrogen occurred when graphene demonstrated intense white light emission under laser irradiation using [37,38]. This emission resulted from the multiphoton ionization of graphene [39,40].

Wieslaw et.al [1] have observed in their earlier experiments with methanol and ethanol that the efficient generation of hydrogen occurred when graphene demonstrated intense white light emission under laser irradiation using [37,38]. This emission resulted from the multiphoton ionization of graphene [39,40].

In the presence of graphene, the process of laser-induced splitting of water may be schematically depicted:



where N is the number of photons  $h\nu$  necessary for multiphoton ionization of graphene,  $\langle C \rangle$  and  $\langle C^+ \rangle$  denote graphene and a single ionized graphene molecule, respectively. Distilled water is a poor conductor of electricity [41]. Adding NaCl turns it into an electrolyte solution (saline) that conducts electricity. Hydrogen production via hydrolysis is more efficient with saline than with distilled water [17,42].

### 1.1. Femtosecond Plasma

It has been investigated by Pawlak et.al. yet unexplored method of water splitting by femtosecond laser pulses (100 fs,  $\lambda = 800$  nm) focused into a quartz cell containing ultra-purified water. Due to plasma-induced radical reactions, the formation of stable products such as molecular  $H_2$  and  $H_2O_2$  was observed and measured as a function of irradiation

time, repetition rate, and pulse energies up to 1 mJ. These observations offered new insights into the fundamental chemical processes occurring in plasma generated in water by focused laser pulses. It was discovered that the energy efficiency of hydrogen production improved as pulse energy and repetition rate decreased. Under optimal irradiation conditions, a favorable stoichiometry for decomposing water solely into pure H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (without O<sub>2</sub>) was attained [36].

New pathways and possibilities are being intensively explored, including the use of microorganisms for hydrogen production [1] and drawing inspiration from butterflies for new solar cells and sunlight water-splitting catalysts [6]. Additionally, it has been discovered that plasma generated by various types of electrical discharges in water creates a highly reactive environment for hydrogen generation, though most research in this area focuses on the production of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [36, 50, 51].

Femtosecond plasma is utilized for precisely localized material processing, including microfabrication [36, 54, 55], laser writing [36, 56], and various emerging applications [58]. It is also used for nanoparticle fabrication [36,58-60] and laser-induced breakdown spectroscopy [61]. Furthermore, femtosecond lasers are widely applied in retinal microsurgery (LASIK) and other medical procedures that demand accurate cutting or tissue ablation [36, 62, 63].

The widespread use of femtosecond lasers in medicine has driven research into the complex interactions between ultra-short laser pulses, plasma generation, and liquid water [64-69]. Various aspects of these phenomena, such as the mechanisms of nonlinear absorption processes, plasma generation, and the dynamics of bubble nucleation, expansion, and collapse, have been thoroughly examined. However, these phenomena were interpreted solely from a physical perspective. For instance, it was incorrectly assumed that the created bubbles contained only water vapor [64, 70, 71].

Hydrogen production was occasionally mentioned in a few studies on the fabrication of metal nanoparticles using femtosecond laser irradiation of aqueous solutions [58, 60]. In these cases, the laser field enhancement near plasmonic particles influenced the mechanisms of plasma initiation and water decomposition, which significantly differ from those in pure water without nanoparticles. Despite extensive research in this field, almost no attention has been paid to the chemical processes occurring during the generation of femtosecond laser-induced plasma in pure liquid water, without any additives. Although Chin and Lagacé [52] investigated the formation of H<sub>2</sub> from water splitting by intense femtosecond pulses, they only speculated that electron-ion recombination in the laser-induced plasma created H, O, and OH radicals, which further recombined to generate H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> according to the overall reaction:

further recombined to generate H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> according to the overall reaction:



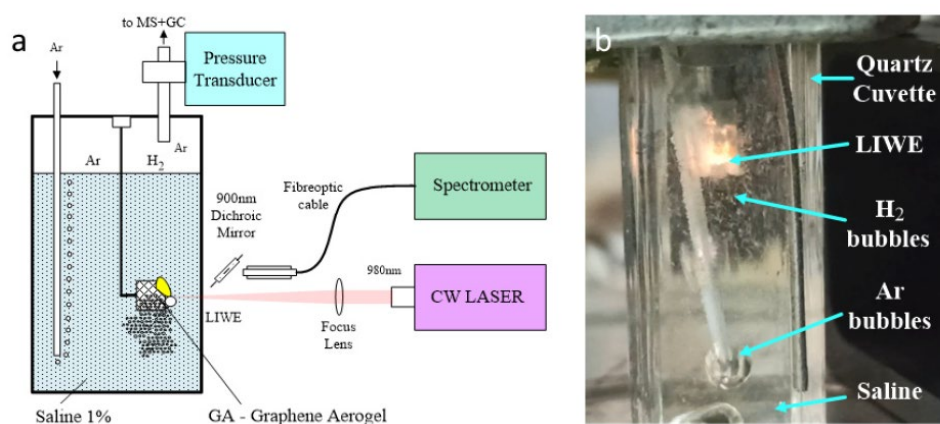
The authors did not confirm the proposed stoichiometry as no quantitative analysis of O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> was conducted [36].

The aim of the authors was to fill this gap, both by a new method of producing pure hydrogen from liquid water and by determining the fundamental chemistry of the plasma generated by femtosecond laser pulses in water.

In this study, it has been proposed a new approach for the direct production of pure H<sub>2</sub> from liquid water using femtosecond laser-induced plasma. The aim of this research is to determine the effect of irradiation conditions of pulse energy and repetition frequency on the efficiency and stoichiometry of water decomposition. Although there has been a large body of research on femtosecond laser irradiation of water and aqueous solutions, this is the first time that the yield of hydrogen production has been quantified under different irradiation conditions. Furthermore, this study explains the nature of the chemical processes occurring in the plasma induced by femtosecond laser pulses in water and provides an explanation of the mechanism of the associated water splitting. Based on the experimental results, we propose an original way of intensifying the process to improve the energy efficiency of hydrogen production and discuss the potential for practical applications. This research should be of interest to a broad scientific community looking for new solutions in energy-related fields, as well as to users of femtosecond lasers in other applications.

## 2. Experimental setup and methods

The CW laser-based experiments were conducted in a quartz cuvette filled with water. A 3D graphene foam scaffold, synthesized as detailed in reference [40], was immersed in water and irradiated with a focused laser beam (see Fig.). A 980 nm CW laser diode (LD) was used as the excitation source. The 3D graphene foam scaffold used in the study is shown in Figure 1b [1]. Gas analysis was performed using a Pfeiffer Vacuum OmniStar QMS 200 mass spectrometer (Asstar, Germany). Gas flow was controlled by Brooks Instrument 5860E series mass flow controllers (Hatfield, PA, USA). Additional calibrations were conducted using a Perkin Elmer Clarus 680 SQ8S GC-MS (Waltham, MA, USA) and an Agilent GC HP 6890 (Santa Clara, CA, USA). The laser exposure time was 60 seconds [1].



**Figure 1.** Experimental set-up for hydrogen generation from water using CW laser and graphene as a photocatalyst (a); Photo of the cuvette of water with immersed graphene scaffold irradiated with 980 nm laser beam (b) [1].

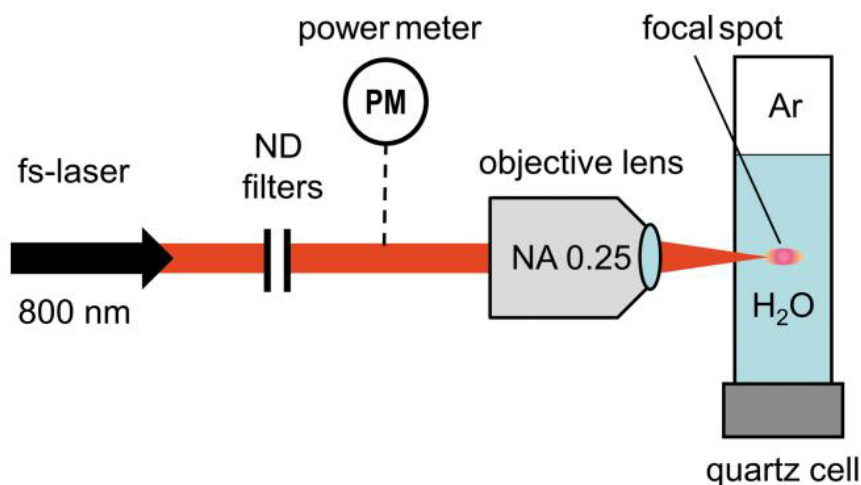
The femtosecond laser pulses were generated using a chirped pulse amplification (CPA) laser system. This setup includes a Ti oscillator (Tsunami, Spectra Physics, 82 MHz, 800 nm, 100 fs pulse duration) pumped by a diode laser (Millennia Pro, Spectra Physics, 532 nm, 5 W). The oscillator's laser pulses are amplified by a chirped pulse regenerative amplifier (Spitfire ACE, Spectra-Physics, 4 W maximum output power, 1 kHz maximum repetition rate) pumped by a Q-switched laser (Empower 30, Spectra Physics, 527 nm, 1 kHz repetition rate, 20 W minimum output power). The output laser pulses were centered at 800 nm with a 100-fs pulse duration and a maximum repetition rate of 1 kHz. The beam, with a full width at half maximum (FWHM) of ~5 mm, was focused by a microscope objective (Zeiss, EC Epiplan-Neofluar, 10×, NA=0.25, WD=9.3 mm) into a quartz cell (F15-UV-10, GL Science) containing ultrapure water under argon. The cell was gas-tight with a screw cap allowing direct punctures for sampling with a chromatographic syringe needle. To prevent hydrogen leakage, the cell was placed upside down during irradiation and sampling for gas chromatography analysis [36].

Figure 2 illustrates the experimental setup for hydrogen decomposition by femtosecond laser. The beam path in front of the objective lens was carefully checked before each irradiation experiment to maintain reproducibility of the focusing conditions. Aligning the optical path of the fs-laser beam was sometimes necessary to ensure the beam consistently hit the center of the objective lens, maintaining a consistent focal spot size and central location within the optical cell. The position of the optical cell was fixed in a special holder during irradiation experiments. Focusing the laser beam produced a visible plasma state and formed small gas bubbles that moved upwards. The average power of the laser beam was measured before the focusing lens using a thermopile power meter (Model 407A, Spectra Physics). Laser pulse energy was tuned by adjusting the laser power with neutral density (ND) optical filters and varying the current on the Q-switched laser that pumps the regenerative amplifier. The experiments were conducted at  $20 \pm 0.2^\circ\text{C}$ , with repetition rates (f) ranging from 100-1000 Hz and pulse energies (E) from  $1.7 \times 10^{-3}$  to 1.0 mJ [36].

The quartz cell was filled with 3 ml of ultrapure degassed water, while the remaining 2 ml volume contained argon. Ultrapure water was obtained using a Millipore Q-Plus system (Millipore GmbH) with a resistivity of  $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  at  $25^\circ\text{C}$  and total organic carbon (TOC) less than 5 ppb. The ultrapure water was degassed using a high vacuum line by repeatedly freezing with liquid nitrogen and thawing, undergoing four cycles of freezing. The prepared water was then transferred to the cell in a laminar chamber under argon, without contact with air.

For each test, after laser irradiation, gas and liquid samples were taken from the cell and analyzed for  $\text{H}_2$  content and products in the liquid phase, specifically  $\text{H}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}_2$ . The presence of oxygen in the gas phase was also investigated. To prevent hydrogen leakage, both gas and liquid samples for gas chromatography (GC) analysis were taken with the cell in an upside-down position.





**Figure 2.** The scheme of experimental setup [36].

### 3. Results and discussion

#### 3.1. CW irradiation

Experiments on hydrogen generation from water were conducted by using laser irradiation on immersed graphene aerogel (GA) as the target. It was discovered that when graphene was irradiated with a focused laser beam, it emitted a strong white light. Graphene is a hydrophobic material, and the interaction of the laser beam with its surface greatly restricts electron ejection from the GA surface and reduces photon emission. However, the presence of NaCl salt significantly stabilizes and enhances light emission from the GA surface because the saline acts as an electrolyte, and hot electrons increase the dissociation of water molecules.

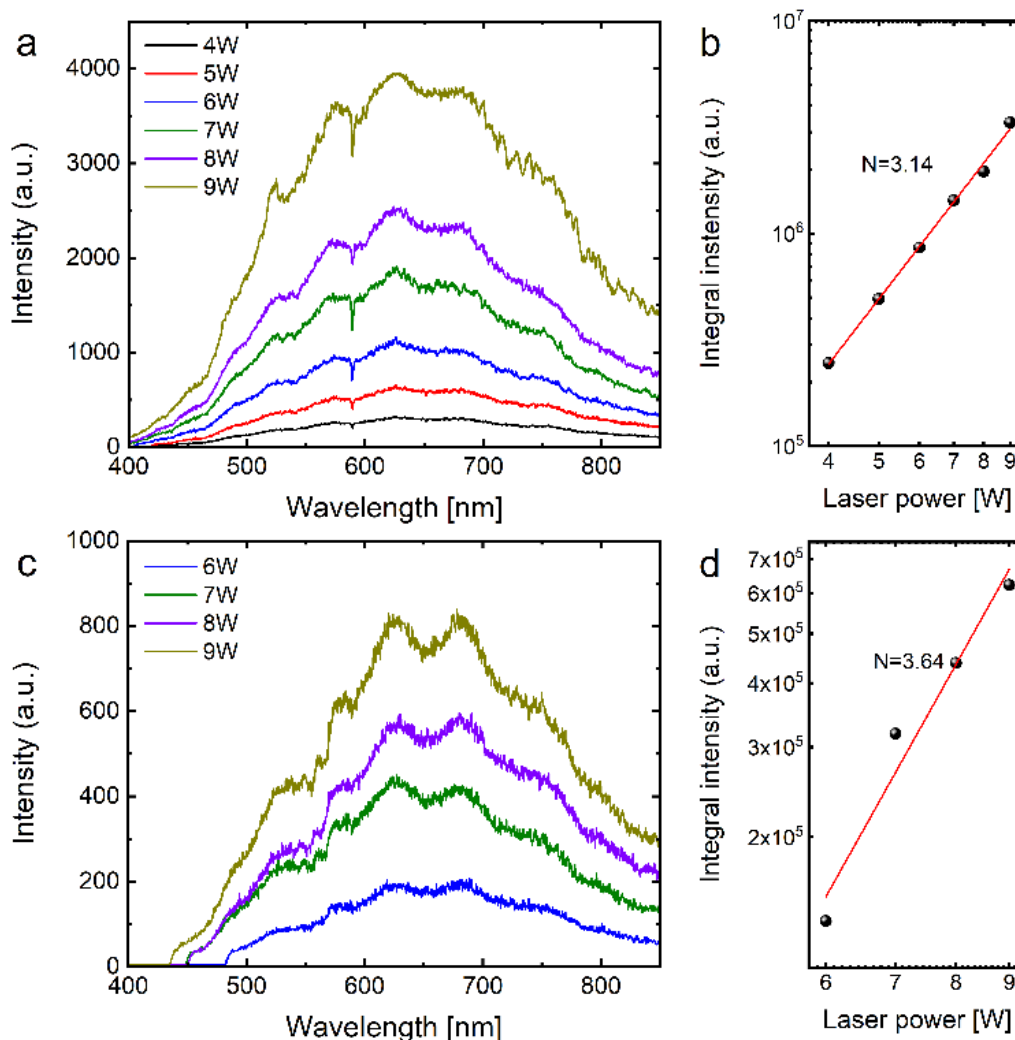
Experiments on hydrogen generation from water were conducted by using laser irradiation on graphene aerogel (GA) submerged in water. When the graphene was irradiated with a focused laser beam, it emitted intense white light at the point of focus. This emission, caused by multiphoton absorption leading to the ionization of carbon atoms, can be described by the following equation [1]:



In this equation,  $C^+$  represents a singly ionized carbon atom,  $e^-$  is an ejected electron,  $N$  is the number of photons required for multiphoton ionization, and  $WE$  denotes the observed white light emission. This light emission is preceded by the ejection of hot electrons, facilitating the dissociation of water molecules on the graphene aerogel surface. The dissociation energy of water (9.8 eV) exceeds the work function of graphene (4.5 eV) [1].

During the experiments by Wieslaw et.al. it has been realized that the laser-induced white emission (LIWE) process was unstable for graphene aerogel immersed in distilled water and irradiated by CW LD, even at low excitation power. The total intensity of white emission was found to be more than ten times lower compared to saline. Figure 3 shows the plots of

excitation power dependencies of the LIWE intensities for GA in both distilled water and saline [1].



**Figure 3.** The emission spectra of laser-irradiated graphene foam with different excitation laser power in saline (a,b) and distilled water (c,d). The narrow dips observed at ~589 nm in the emission spectrum of saline water may be assigned to the  $\text{Na}^+$  ions due to the dissociation of NaCl. They were not seen for distilled water.

At 1% of saline water the LIWE process is very stable and more intense by at least one order of magnitude. It is important to highlight that the electric characteristics of NaCl solution in distilled water strictly depend on the dynamics of the phenomena occurring in them [43].

**Table 1.** The ratio of gas products of laser-induced decomposition of distilled water in a function of applied laser power in an argon atmosphere [1].

Ar 20 mL/min H <sub>2</sub> O-Distilled Water				
Laser Power [W]	Gas Products			
	H <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CO [%]
10.0	47.00	10.44	11.23	31.33
9.0	54.42	6.80	11.56	27.21
8.0	54.30	9.05	9.50	27.15
7.0	53.25	11.83	11.24	23.67
6.0	55.56	7.94	12.70	23.81

According to Table 1 it can be seen, that the amount of H<sub>2</sub> is significantly decrease if we increase the laser excitation above 9W for distilled water. H<sub>2</sub> reached 47.00% at 10W excitation power, while CO was 31.33%. O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> were emitted in much smaller amounts, around 11% each.

**Table 2.** The ratio of gas products of laser-induced decomposition of 1% saline in a function of applied laser power in an argon atmosphere [1].

Ar 20 mL/min H <sub>2</sub> O + 1% NaCl				
Laser Power [W]	Gas Products			
	H <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CO [%]
10.0	79.95	8.13	3.66	8.27
9.0	78.99	8.52	4.27	8.21
8.0	78.48	8.43	4.85	8.23
7.0	78.21	8.93	5.10	7.75
6.0	77.81	9.07	5.42	7.70
5.5	80.91	8.17	4.84	6.08
5.0	59.21	14.47	6.58	19.74
4.5	57.14	22.86	8.57	11.43

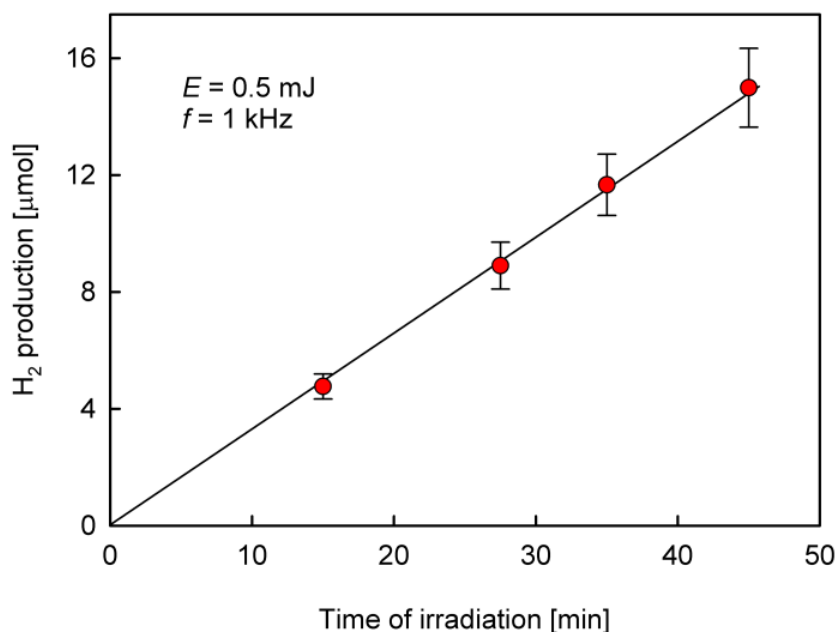
Table 2 indicates that the percentage of hydrogen in saline rises from 57.14% to 80.91% as the excitation power increases from 4.5W to 5.5W. Conversely, the percentages of O<sub>2</sub>, CO, and CO<sub>2</sub> gases decrease gradually with increasing laser power. It is important to note that at an excitation power of 5.5 W, the CO<sub>2</sub> content was extremely low (4.84%). Increasing the laser power significantly enhances the multiphoton ionization of graphene, aided by intense white emission and the ejection of hot electrons. The increase in white emission and electron ejection is exponentially dependent on the excitation laser power. Consequently, the high generation of electrons leads to a substantial increase in hydrogen production [1].

### 3.2 Irradiation time

The initial step in studying water splitting with femtosecond laser-induced plasma involved determining the relationship between the amount of hydrogen produced and the irradiation time. Figure 4 illustrates this relationship, showing the highest amount of hydrogen (approximately 15 μmol) obtained under continuous irradiation in our experiments. The plot

is a straight line starting at (0,0), indicating that the amount of hydrogen is directly proportional to the exposure time [36].

As the concentration of plasma products (such as H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) dissolved in the water increases in the limited volume of the cell, it could potentially alter the plasma processes over time, thus affecting the observed relationship. However, Figure 2 demonstrates that this dependence remains linear over the entire time range studied, confirming that no secondary reactions involving plasma products dissolved in the water, nor any local heating effects, significantly impact the hydrogen evolution process [36].



**Figure 4.** Linear dependence between the amount of evolved hydrogen and the time of fs-laser irradiation [36].

### 3.3 Pulse energy

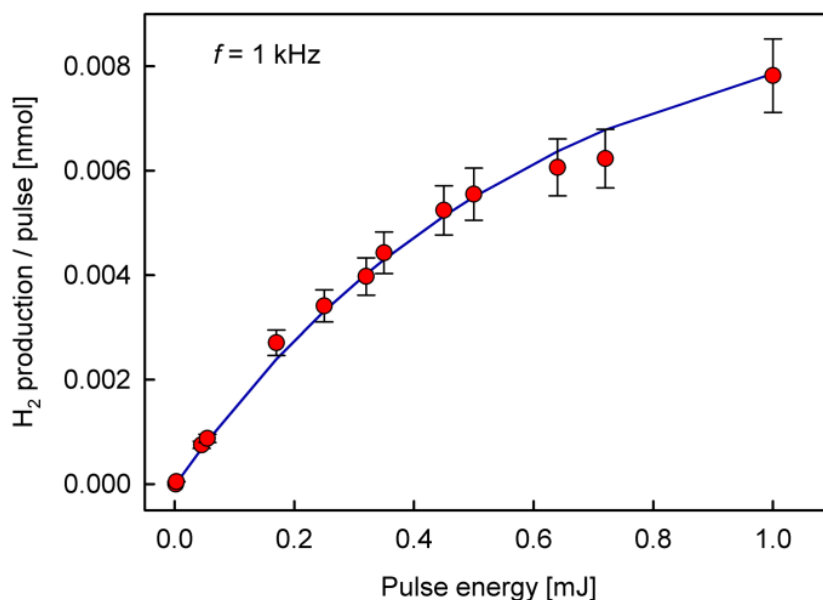
Figure 5 illustrates how hydrogen production per laser pulse depends on pulse energy. Hydrogen output increases with pulse energy but tends to saturate. This effect relates to plasma generation in water by a femtosecond laser pulse. Initially, seed electrons are created in the focal volume via multiphoton absorption [59]. With an 800 nm laser wavelength, the single photon energy is 1.55 eV, requiring a 6-photon process (or 5-photon process if considering an ionization potential of 6.6 eV) to ionize water molecules [78]. These electrons gain kinetic energy by absorbing more photons, leading to further ionization and increased plasma density [68]. Within picoseconds, various processes produce OH and H radicals, which then recombine within up to 10<sup>-6</sup> seconds [70].

Similar to the generation of molecular hydrogen during the radiolysis of water in nanoscale pores (representing a confined plasma volume), hydrogen production can be described by this empirical formula [71]:

$$N_{H_2} = N_{\infty}(1 - \exp(-k(E - E_0))) \quad (9)$$

where  $NH_2$  denotes the amount of  $H_2$  produced per pulse as a function of pulse energy ( $E$ ).  $N_\infty$  represents the maximum hydrogen output at infinite pulse energy,  $E_0$  is the energy threshold, and  $k$  is a parameter indicating the rate of increase in  $H_2$  production per pulse as the pulse energy rises. The mass deficit effects mentioned earlier are encompassed within the  $N_\infty$  and  $k$  parameters.

The data in Figure 3 were well-matched by Equation 8 ( $p = 0.0002$ ,  $r^2 = 0.992$ ), yielding parameters:  $N_\infty = 0.0096 \pm 0.0005$  nmol,  $k = 1.5 \pm 0.2$  mJ<sup>-1</sup>, and  $E_0 = 0.002 \pm 0.009$  mJ. In this context,  $E_0$  represents the minimum pulse energy needed to initiate hydrogen production. However, as noted, the  $E_0$  parameter has a significant margin of error, making the estimate less precise [36].



**Figure 5.** Dependence of hydrogen production per a single laser pulse on the pulse energy (red points). The curve represents the fit of the experimental points with Eq. (9) [36].

It is challenging to determine the number of photons in the plasma volume actively participating in the reaction. As the laser pulse energy increases, more photons reach the focal volume, expanding the plasma volume in water. According to Potemkin et al., the plasma channel length logarithmically depends on pulse energy, while the diameter grows with the square root of the pulse energy and saturates around 100  $\mu$ J. Photon density, and thus hydrogen production, increases almost proportionally with higher pulse energy, assuming an unlimited supply of water molecules. However, in a limited plasma volume, a mass deficit occurs as pulse energy increases, limiting the electron density and the amount of hydrogen produced [85-87].

#### 4. Conclusions

In this paper in one hand, Wieslaw et.al. [1] report on laser-induced hydrogen generation from water using graphene foam as a photocatalyst. The experiments were conducted with both distilled and saline water. The results indicated that hydrogen production was significantly more efficient with saline water. Laser irradiation produced hydrogen, oxygen, carbon monoxide, and carbon dioxide as the main gas products. The process exhibited threshold behavior and was highly dependent on the excitation laser power. Hydrogen generation increased markedly with laser power in the range of 4.5–5.5W. The proportion of hydrogen produced was considerably higher than that of other gases, such as oxygen, carbon monoxide, and carbon dioxide. For saline water, hydrogen production reached nearly 81%, compared to 47% for distilled water. This represents the highest-efficiency process of laser-induced hydrogen generation from water reported in the literature. The technology of using relatively stable and inexpensive high-power laser diodes with graphene as a photocatalyst shows great promise for applications in the construction of small-scale hydrogen generators directly connected to fuel cells.

In the other hand the results presented by Pawlak et.al. [36] demonstrate that splitting liquid water using femtosecond laser-induced plasma is a promising new method for producing pure hydrogen, offering both practical application potential and significant scientific insight. The primary stable products of the plasma processes are H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, with hydrogen peroxide partially decomposing into H<sub>2</sub>O and O<sub>2</sub>. The general stoichiometric equation describes the overall splitting process. Research into the relationship between the quantities of H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and laser pulse energy, as well as the effect of laser repetition rate on H<sub>2</sub> production, has suggested a new method to enhance the process [36]. The influence of the repetition rate is not discussed in this paper, but Pawlak et. al. have proven that in terms of energy efficiency for hydrogen production, their most effective system (using a pulse energy of 0.1 mJ, water flow, and a repetition rate of 1000 Hz) yields approximately 0.4 g H<sub>2</sub>/kWh when the pulse energy is considered the energy input. This efficiency is significantly higher than the 0.01 g H<sub>2</sub>/kWh reported for photocatalytic water decomposition and is comparable to other plasma-based methods for hydrogen production, such as corona discharges (2 g H<sub>2</sub>/kWh) and gliding arc discharges (1.3 g H<sub>2</sub>/kWh) [36][88]. This method aims to improve the energy yield of hydrogen generation and ensure pure hydrogen as the sole gaseous product. It involves using multiple low-energy beams to generate plasma at different locations, rather than a single high-energy beam, combined with a sufficiently fast water flow to remove post-plasma effects (such as gas bubbles and created H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) from the focal volume between successive pulses.

#### 5. References

[1] Wieslaw Strek, Przemysław Wiewiórski, Włodzimierz Miśta, Robert Tomala and Mariusz Stefanski: Laser-Induced Generation of Hydrogen in Water by Using Graphene Target, Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences, 50-422 Wrocław, Poland; *Molecules* 2022, 27, 718.

- [2] Abuadala, A.; Dincer, I. A review on biomass-based hydrogen production and potential applications. *Int. J. Energy Res.* 2012, 36, 415–455.
- [3] Mujeebu, M.A. Hydrogen and syngas production by superadiabatic combustion—A review. *Appl. Energy* 2016, 173, 210–224.
- [4] Kalinci, Y.; Hepbasli, A.; Dincer, I. Biomass-based hydrogen production: A review and analysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009, 34, 8799–8817.
- [5] Rahimpour, M.R.; Jafari, M.; Iranshahi, D. Progress in catalytic naphtha reforming process: A review. *Appl. Energy* 2013, 109, 79–93
- [6] Trane, R.; Dahl, S.; Skjøth-Rasmussen, M.S.; Jensen, A.D. Catalytic steam reforming of bio-oil. *Int. J. Hydrogen Energy* 2012, 37, 6447–6472.
- [7] Iranshahi, D.; Pourazadi, E.; Paymooni, K.; Rahimpour, M.R.; Jahanmiri, A.; Moghtaderi, B. A dynamic membrane reactor concept for naphtha reforming, considering radial-flow patterns for both sweeping gas and reacting materials. *Chem. Eng. J.* 2011, 178, 264–275.
- [8] Ligthart, D.A.J.M.; Van Santen, R.A.; Hensen, E.J.M. Influence of particle size on the activity and stability in steam methane reforming of supported Rh nanoparticles. *J. Catal.* 2011, 280, 206–220.
- [9] Boyano, A.; Blanco-Marigorta, A.M.; Morosuk, T.; Tsatsaronis, G. Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production. *Energy* 2011, 36, 2202–2214.
- [10] Xu, J.; Chen, L.; Tan, K.F.; Borgna, A.; Saeys, M. Effect of boron on the stability of Ni catalysts during steam methane reforming. *J. Catal.* 2009, 261, 158–165.
- [11] Elsharnouby, O.; Hafez, H.; Nakhla, G.; El Naggat, M.H. A critical literature review on biohydrogen production by pure cultures. *Int. J. Hydrogen Energy* 2013, 38, 4945–4966.
- [12] Levin, D.B.; Pitt, L.; Love, M. Biohydrogen production: Prospects and limitations to practical application. *Int. J. Hydrogen Energy* 2004, 29, 173–185.
- [13] Das, D.; Veziroglu, T.N. Hydrogen production by biological processes: A survey of literature. *Int. J. Hydrogen Energy* 2001, 26, 13–28.
- [14] Burmistrz, P.; Chmielniak, T.; Czepirski, L.; Gazda-Grzywacz, M. Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification. *J. Clean. Prod.* 2016, 139, 858–865.
- [15] Huang, J.; Dincer, I. Parametric analysis and assessment of a coal gasification plant for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* 2014, 39, 3294–3303.
- [16] Seyitoglu, S.S.; Dincer, I.; Kilicarslan, A. Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. *Int. J. Hydrogen Energy* 2017, 42, 2592–2600.

- [17] Slama, R. Ben Production of Hydrogen by Electrolysis of Water: Effects of the Electrolyte Type on the Electrolysis Performances. *Comput. Water Energy Environ. Eng.* 2013, 2, 54–58.
- [18] Atlam, O.; Kolhe, M. Equivalent electrical model for a proton exchange membrane (PEM) electrolyser. *Energy Convers. Manag.* 2011, 52, 2952–2957.
- [19] Siracusano, S.; Baglio, V.; Briguglio, N.; Brunaccini, G.; Di Blasi, A.; Stassi, A.; Ornelas, R.; Trifoni, E.; Antonucci, V.; Aricò, A.S. An electrochemical study of a PEM stack for water electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 2012, 37, 1939–1946.
- [20] Barbir, F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Sol. Energy* 2005, 78, 661–669.
- [21] Staffell, I.; Scamman, D.; Velazquez Abad, A.; Balcombe, P.; Dodds, P.E.; Ekins, P.; Shah, N.; Ward, K.R. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy Environ. Sci.* 2019, 12, 463–491.
- [22] Grubb, W.T. Batteries with Solid Ion Exchange Electrolytes.1. Secondary Cells Employing Metal Electrodes. *J. Electrochem. Soc.* 1959, 106, 275–278.
- [23] Xu, W.; Scott, K. The effects of ionomer content on PEM water electrolyser membrane electrode assembly performance. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 12029–12037.
- [24] Dönitz, W.; Erdle, E. High-temperature electrolysis of water vapor-status of development and perspectives for application. *Int. J. Hydrogen Energy* 1985, 10, 291–295.
- [25] Laguna-Bercero, M.A. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. *J. Power Sources* 2012, 203, 4–16.
- [26] Kadier, A.; Simayi, Y.; Abdeshahian, P.; Azman, N.F.; Chandrasekhar, K.; Kalil, M.S. A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. *Alex. Eng. J.* 2016, 55, 427–443.
- [27] Liu, H.; Grot, S.; Logan, B.E. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39, 4317–4320.
- [28] Zeng, K.; Zhang, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2010, 36, 307–326.
- [29] Burnat, D.; Schlupp, M.; Wichser, A.; Lothenbach, B.; Gorbar, M.; Züttel, A.; Vogt, U.F. Composite membranes for alkaline electrolysis based on polysulfone and mineral fillers. *J. Power Sources* 2015, 291, 163–172.
- [30] Kawai, T.; Sakata, T. Hydrogen evolution from water using solid carbon and light energy. *Nature* 1979, 282, 283–284.
- [31] Akimoto, I.; Maeda, K.; Ozaki, N. Hydrogen generation by laser irradiation of carbon powder in water. *J. Phys. Chem. C* 2013, 117, 18281–18285.
- [32] Maeda, K.; Ozaki, N.; Akimoto, I. Alcohol additive effect in hydrogen generation from water with carbon by photochemical reaction. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2014, 53, 05FZ03.



- [33] Seyitliyev, D.; Kholikov, K.; Grant, B.; San, O.; Er, A.O. Laser-induced hydrogen generation from graphite and coal. *Int. J. Hydrogen Energy* 2017, 42, 26277–26288.
- [34] Coughlin, R.W.; Farooque, M. Hydrogen production from coal, water and electrons. *Nature* 1979, 279, 301–303.
- [35] Barmina, E.V.; Simakin, A.V.; Shafeev, G.A. Hydrogen emission under laser exposure of colloidal solutions of nanoparticles. *Chem. Phys. Lett.* 2016, 655–656, 35–38.
- [36] Kierzkowska-Pawlak, H.; Tyczkowski, J.; Jarota, A.; Abramczyk, H. Hydrogen production in liquid water by femtosecond laser-induced plasma. *Appl. Energy* 2019, 247, 24–31.
- [37] Strek, W.; Mista, W.; Wiewiorski, P.; Tomala, R. Laser induced hydrogen emission from ethanol with dispersed graphene particles. *Chem. Phys. Lett.* 2021, 775, 138649.
- [38] Strek, W.; Wiewiorski, P.; Mista, W.; Hanulia, T.; Tomala, R. Laser-Induced Hydrogen Generation from Methanol with Graphene Aerogel as the Target. *ACS Omega* 2021, 6, 3711–3716.
- [39] Strek, W.; Cichy, B.; Radosinski, L.; Gluchowski, P.; Marciniak, L.; Lukaszewicz, M.; Hreniak, D. Laser-induced white-light emission from graphene ceramics—opening a band gap in graphene. *Light Sci. Appl.* 2015, 4, e237.
- [40] Strek, W.; Tomala, R.; Lukaszewicz, M.; Cichy, B.; Gerasymchuk, Y.; Gluchowski, P.; Marciniak, L.; Bednarkiewicz, A.; Hreniak, D. Laser induced white lighting of graphene foam. *Sci. Rep.* 2017, 7, 41281.
- [41] Widodo, C.S.; Sela, H.; Santosa, D.R. The effect of NaCl concentration on the ionic NaCl solutions electrical impedance value using electrochemical impedance spectroscopy methods. In *AIP Conference Proceedings*; AIP Publishing LLC: Melville, NY, USA, 2018; Volume 2021, p. 050003.
- [42] Yu, Z.; Xu, J.; Meng, L.; Liu, L. Efficient hydrogen production by saline water electrolysis at high current densities without the interfering chlorine evolution. *J. Mater. Chem. A* 2021, 9, 22248–22253.
- [43] Shiva Kumar, S.; Himabindu, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. *Mater. Sci. Energy Technol.* 2019, 2, 442–454.
- [44] Navarro RM, Alvarez-Galvan MC, Villoria De La Mano JA, Al-Zahrani SM, Fierro JLG. A framework for visible-light water splitting. *Energy Environ. Sci* 2010; 3(12):1865-1882. <https://doi.org/10.1039/C001123A>
- [45] Schmidt O, Gambhir A, Staffell I, Hawkes A, Nelson J, Few S. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *Int J Hydrogen Energy* 2017; 42:30470–30492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>

- [46] Bicer Y, Sprotte AFV, Dincer I. Concentrated solar light splitting using cold mirrors for photovoltaics and photonic hydrogen production applications. *Appl Energy* 2017; 197:169-182.
- [47] Reilly K, Wilkinson DP, Taghipour F. Photocatalytic water splitting in a fluidized bed system: Computational modeling and experimental studies. *Appl Energy* 2018; 222: 423-436. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.020>
- [48] Essehli R, Crumière F, Blain G, Vandenborre J, Pottier F, Grambow B, Fattahi M, Mostafavi M. H<sub>2</sub> production by  $\gamma$  and He ions water radiolysis, effect of presence TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:14342–14348. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.136>
- [49] Lou S, Guo X, Fan T, Zhang D. Butterflies: inspiration for solar cells and sunlight water-splitting catalysts. *Energy Environ. Sci.* 2012;5:9195–9216. <https://doi.org/10.1039/C2EE03595B>
- [50] Bruggeman P, Kushner MJ, Locke BR, Gardeniers JG, Graham W, Graves DB, Hofman-Caris R, Maric D, Reid JP, Ceriani E. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma Sources Science and Technology* 2016;25:053002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>
- [51] Locke BR, Shih KY. Review of the methods to form hydrogen peroxide in electrical discharge plasma with liquid water. *Plasma Sources Sci Technol* 2011; 20(3):034006. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/20/3/034006>
- [52] Chin SL and Lagacé S. Generation of H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> from water by the use of intense femtosecond laser pulses and the possibility of laser sterilization. *Appl. Opt.* 1996;35:907–911.
- [53] Maatz G, Heisterkamp A, Lubatschowski H, Barcikowski S, Fallnich C, Welling H, Ertmer W. Chemical and physical side effects at application of ultrashort laser pulses for intrastromal refractive surgery. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 2000; 2(1): 59.
- [54] Sugioka K, Meunier M, Piqué A. (Eds) *Laser precision microfabrication*. Berlin: Springer; 2010.
- [55] Otuka AJG, Almeida JMP, Tribuzi V, Cardoso MR, Hernandez AC, Correa DS, Mendonca CR. Femtosecond lasers for processing glassy and polymeric materials *Materials Research* 2014;17:352–358.
- [56] Fernandez TT, Siegel J, Hoyo J, Sotillo B, Fernandez P, Solis J. Controlling plasma distributions as driving forces for ion migration during fs laser writing. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2015;48:155101.
- [57] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, Hayasaki Y, Mizeikis V, Buividas R, Juodkasis S. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry. *Light:Science&Application* 2016;5:e16133. <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.133>
- [58] Nakamura T, Mochidzuki Y, Sato S. Fabrication of gold nanoparticles in intense optical field by femtosecond laser irradiation of aqueous solution. *Journal of Materials Research* 2018;23(4):968-974.

- [59] Caricato A P, Luches A, Martino M. Laser Fabrication of Nanoparticles. In: Aliofkhaezrai M (Ed). Handbook of Nanoparticles. Switzerland: Springer; 2016, p. 407–428
- [60] Meader VK, John MG, Rodrigues CJ, Tibbetts KM. Roles of Free Electrons and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in the Optical Breakdown-Induced Photochemical Reduction of Aqueous [AuCl<sub>4</sub>]<sup>-</sup>. The Journal of Physical Chemistry A 2017;121:6742–6754. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.7b05370>
- [61] Patnaik AK, Adamovich I, Gord, JR, Roy S. Recent advances in ultrafast-laser-based spectroscopy and imaging for reacting plasmas and flames. Plasma Sources Sci Technol 2017;26(10):103001.
- [62] Soong HK and Malta JB. Femtosecond lasers in ophthalmology. American journal of ophthalmology 2009;147:189–197.
- [63] Grewal DS, Schultz T, Basti S, Dick HB. Femtosecond laser–assisted cataract surgery–current status and future directions. Survey of ophthalmology 2016;1:103–131.
- [64] Liu F, Yuan S, Zuo Z, Li W, Zeng H. Laser filamentation induced bubbles and their motion in water. Optics express 2016;24:13258–13263.
- [65] Kennedy PK, Hammer DX, Rockwell BA. Laser-induced breakdown in aqueous media. Progress in quantum electronics 1997;21:155–248.
- [66] Vogel A, Noack J, Hüttman G, Paltauf G. Mechanisms of femtosecond laser nanosurgery of cells and tissues. Applied Physics B 2005;81:1015–1047.
- [67] De Giacomo A, Dell'Aglio M, Gaudioso R, Amoroso S, De Pascale O. Effects of the background environment on formation, evolution and emission spectra of laser-induced plasmas. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 2012;78:1–19.
- [68] Sarpe C, Köhler J, Winkler T, Wollenhaupt M, Baumert T. Real-time observation of transient electron density in water irradiated with tailored femtosecond laser pulses. New Journal of Physics 2012;14:075021.
- [69] Efimenko ES, Malkov YA, Murzanev AA, Stepanov AN. Femtosecond laser pulse-induced breakdown of a single water microdroplet. JOSA B 2014;31:534–541.
- [70] Tinne N, Knoop G, Kallweit N, Veith S, Bleeker S, Lubatschowski H, Ripken T. Effects of cavitation bubble interaction with temporally separated fs-laser pulses. Journal of Biomedical Optics 2014;19:048001.
- [71] Mizushima Y, Saito T. Nonlinear bubble nucleation and growth following filament and white-light continuum generation induced by a single-shot femtosecond laser pulse into dielectrics based on consideration of the time scale. Applied Physics Letters 2015;107:114102.
- [72] Chen Q, Li J, Li Y. A review of plasma–liquid interactions for nanomaterial synthesis. Journal of Physics D: Applied Physics 2015;48:424005.
- [73] Yang CAO, Guangzhou QU, Tengfei LI, Jiang N, Tiecheng WANG. Review on reactive species in water treatment using electrical discharge plasma: formation, measurement, mechanisms and mass transfer. Plasma Science and Technology 2018; 20(10):103001.
- [74] Eisenberg G. Colorimetric determination of hydrogen peroxide. Ind. Eng. Chem. Anal. Ed. 1943;15:327–328.

- [75] Lewis D. The Absorption Spectrum of the Titanium (IV)–Hydrogen Peroxide Complex. *J. Phys. Chem.* 1958;62:1145–1146.
- [76] Kolev NI. Solubility of O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in water. In: Kolev NI (Ed) *Multiphase Flow Dynamics 4*. Berlin: Springer–Verlag; 2012, p. 209–239.
- [77] Kirkpatrick M J, Locke BR. Hydrogen, oxygen, and hydrogen peroxide formation in aqueous phase pulsed corona electrical discharge. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005; 44; 4243–4248.
- [78] Minardi S, Milián C, Majus D, Gopal A, Tamošauskas G, Couairon A, Dubietis A. Energy deposition dynamics of femtosecond pulses in water. *Applied Physics Letters* 2014;105:224104.
- [79] Linz N, Freidank S, Liang XX, Vogel A. Wavelength dependence of femtosecond laser-induced breakdown in water and implications for laser surgery. *Physical Review B*, 2016; 94(2): 024113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.024113>
- [80] Garrett BC, Dixon DA, Camaioni DM, Chipman DM, Johnson MA, Jonah CD, Xantheas SS. Role of water in electron-initiated processes and radical chemistry: Issues and scientific advances. *Chemical Reviews* 2005;105:355–390.
- [81] Le Caër S, Rotureau P, Brunet F, Charpentier T, Blain G, Renault JP, Mialocq JC. Radiolysis of confined water: Hydrogen production at a high dose rate. *ChemPhysChem* 2005; 6:2585–2596.
- [82] Lin CC. *Radiochemical Technology in Nuclear Power Plants*. 1st ed. Illinois: American Nuclear Society; 2013.
- [83] Reuther A, Laubereau A, Nikogosyan D N. Primary photochemical processes in water. *The Journal of Physical Chemistry* 1996; 100(42):16794–16800. <https://doi.org/10.1021/jp961462v>
- [84] Meader VK, John MG, Frias Batista LM, Ahsan S, Tibbetts KM. Radical Chemistry in a Femtosecond Laser Plasma: Photochemical Reduction of Ag<sup>+</sup> in Liquid Ammonia Solution. *Molecules* 2018; 23(3):532. <https://doi.org/10.3390/molecules23030532>
- [85] Potemkin FV, Mareev EI, Podshivalov AA, Gordienko VM. Highly extended high density filaments in tight focusing geometry in water: from femtoseconds to microseconds. *New Journal of Physics* 2015;17:053010.
- [86] Linz N, Freidank S, Liang X, Noack J, Paltauf G and Vogel A. AFOSR International Research Initiative Project SPC 053010/EOARD, Grant FA 8655–05–1–3010, 2009 Final Report.
- [87] Yasuda H. *Plasma polymerization*. 1st ed. Orlando: Academic Press; 1985.
- [88] Rehman F, Abdul Majeed WS, Zimmerman WB. Hydrogen production from water vapor plasmolysis using DBD-Corona hybrid reactor. *Energy & Fuels* 2013;27:2748–2761.

# On-line monitoring, kalibracija i inspekcija opreme za zavarivanje

## *On-line monitoring, calibration and inspection of welding equipment*

D. Marić<sup>1,\*</sup>, D.Takac<sup>2</sup>, J. Mijić<sup>1</sup>, I. Deanović<sup>1</sup>, I. Samardžić<sup>1</sup>, T. Šolić<sup>1</sup>, M. Samardžić<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>2</sup>Slavonija DI d.o.o., Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>3</sup>FI Group d.o.o., Slavonski Brod, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: dmaric@unisb.hr

### Sažetak

U radu su prikazane tehnike on-line monitoringa, kalibracije i inspekcije uređaja za zavarivanje. Opisana je primjena norme HRN EN IEC 60974-14, gdje su navedeni zahtjevi za provjeru elektrolučnog zavarivanja i nadzor vanjske opreme. Norma također definira praktičnu provedbu postupka provjere opreme za postupke elektrolučnog zavarivanja. Opisane su različite tehnike on-line praćenja glavnih parametara zavarivanja (struja, napon, brzina zavarivanja, protok plina, brzina žice).

**Ključne riječi:** on-line monitoring, kalibracija, zavarivačka oprema, glavni parametri

### Abstract

The paper presents the techniques of on-line monitoring, calibration and inspection of welding devices. The application of the HRN EN IEC 60974-14 standard is described, where the requirements for checking electric arc welding and monitoring external equipment are specified. The standard also defines the practical implementation of the equipment check procedure for electric arc welding processes. Different techniques of on-line monitoring of the main welding parameters (current, voltage, welding speed, gas flow, wire speed) are described.

**Key words:** on-line monitoring, calibration, welding equipment, main parameters

### 1. Uvod

Izvori struje za zavarivanje te prateća oprema za zavarivanje (oprema za toplinsku obradu, predgrijavanje, peći i tobojci za dodatni materijal, ...) su od izuzetno velike važnosti za kvalitetnu provedbu postupka zavarivanja ali u konačnici imaju veliki utjecaj i na kvalitetu zavarenoga spoja. Osim toga praćenjem parametara zavarivanja omogućuje se razvoj



sustava koji će vršiti analizu i kvalifikaciju novih sustava za ocjenu kvalitete zavarenih spojeva [1].

Kako na kvalitetu zavarenoga spoja uvelike utječu i parametri zavarivanja potrebno je provoditi određene mjere njihove kontrole i u konačnici umjeravanja. Stoga se prema normama zahtijeva konstantno umjeravanje i validacija opreme za zavarivanje što održava određenu kvalitetu zavarivačkih radova u proizvodnom procesu. Kako je projektiranje i provođenje tehnologije zavarivanja usko definirano različitim normama i standardima postiže omogućuje se postizanje izrazito visoke kvalitete zavarenih proizvoda.

Uređaji za elektrolučne procese zavarivanja podrazumijevaju skup komponenti a neke od komponenti su:

- izvor struje za zavarivanje
- dodavači žice,
- masa, gorionici,
- sustav za regulaciju zaštitnog plina,
- rashladni sustavi
- boca sa zaštitnim plinom.

Izvori struje za zavarivanje glavne su komponente uređaja za zavarivanje spajaju se na gradsku električnu mrežu ili tamo gdje nema električne mreže spajaju se na generatore koji omogućuju pokretanje izvora struje za zavarivanje. O građi izvora struje za zavarivanje ovise izlazni parametri zavarivanja (vrsta struje, polaritet, ...). Izvori struje za zavarivanje dijele se na: transformatore, ispravljače i invertere [2].

## **2. Norme i standardi za potrebe umjeravanja i provjeravanja opreme za zavarivanje**

Bilo da se radi o malim vrijednostima struje i napona ili velikim vrijednostima pravilno i precizno podešavanje parametara utječe na kvalitetu zavarenoga spoja. Proizvođač opreme za zavarivanje ali i proizvodni pogoni koji koriste opremu su odgovorni za pravilan rad uređaja za zavarivanje, njegovo umjeravanje i pregled.

Oprema za mjerenje, pregled i ispitivanje može se grupirati kako slijedi: [3]

1. Dokazivanje sukladnosti proizvoda s određenim zahtjevima.
2. Kontrola procesa kod kojih se rezultat izlaza ne može lako ili ekonomski provjeriti naknadnim praćenjem, inspekcijom i ispitivanjem.
3. Opća kontrola procesa.

Za dokazivanje sukladnosti proizvoda prema zahtjevima (1.) koristi se potrebna oprema za mjerenje, inspekciju i ispitivanje te bi trebala biti pravilno kalibrirana, provjerena ili validirana a što su zahtjevi standarda ISO 9001. Mnogi od postupaka koji se koriste u inspekcijom postupku sukladnosti, obuhvaćeni su standardima koji tipično uključuju odredbe za kalibraciju, provjeru ili validaciju. Svojstva kvalitete moraju se dokumentirati odgovarajućom proizvodnom dokumentacijom koja je definirana normom po kojoj se provodi (2.). Oprema za mjerenje, inspekciju i ispitivanje procesa također mora biti kalibrirana, verificirana ili provjerena (3.) [3].



Proizvodni pogoni u kojima se nalazi oprema za zavarivanje dužni su jednom godišnje izvršiti provjeru, kalibraciju i validaciju opreme za zavarivanje, naravno ukoliko je to potrebno i ako je utvrđeno određenim drugim pravilima moguće je istu provesti nekoliko puta, prema pravilima koja slijede a sve u skladu s normom HRN EN IEC 60974-14 gdje su specificirani zahtjevi za provjeru elektrolučnog zavarivanja i nadzor vanjske opreme:

- kad god postoje naznake da se instrument nije pravilno registrirao;
- kad god je oprema vidljivo oštećena i ako je šteta imala utjecaj na funkciju jednog ili više instrumenata;
- kad god je oprema zlouporabljena, preopterećena, itd. ili predmet bilo kojeg drugog događaja koji je mogao dovesti do oštećenja jednog ili više instrumenata;
- kad god je oprema obnovljena ili popravljena, te kod nabavke nove opreme [3].

U tablici 1 definirane su kalibracijske vrijednosti za opremu koja pri mjerenju pokazuje rezultate na zaslonu (displeju), dok su u tablici 2 dane validacijske vrijednosti klasificirane na fizičkim jedinicama na uređajima koji nemaju displej, pri čemu je referentan vrijednost ona postavljena na potenciometru.

Oprema koja se koristi za mjerenje mora biti umjerena.

**Tablica 1.** Kalibracijska točnost prikazanih vrijednosti [4]

Mjerenje	Tip mjernog instrumenta	Standardni razred	Precizni razred	Referenca
Struja	Analogno	$\pm 2,5\%$	$\pm 1\%$	od gornjeg raspona vrijednosti instrumenta
	Digitalno	$\pm 2,5\%$	$\pm 1\%$	najveće nazivne vrijednosti za struju zavarivanja prema natpisnoj pločici
Napon	Analogno	$\pm 2,5\%$	$\pm 1\%$	od gornjeg raspona vrijednosti instrumenta
	Digitalno	$\pm 1,5\text{ V}$ ili $\pm 2,5\%$	$\pm 0,6\text{ V}$ ili $\pm 1\%$	preferirana metoda ili nazivnog napona praznog hoda ( $U_0$ ) ili prema specifikacijama proizvođača
Brzina dodavanja žice	Analogno ili digitalno	$\pm 2,5\%$		maksimalne postavke ispod 25% maksimalne postavke
		$\pm 10\%$		od referentne vrijednosti između 25% i 100% maksimalne postavke
	Analogno ili digitalno		$\pm 2,5\%$	maksimalne postavke ispod 40% maksimalne postavke
			$\pm 6,25\%$	od referentne vrijednosti između 40% i 100% maksimalne postavke

Sam proces umjeravanja najjednostavnije je provoditi preko kalibratora koje posjeduju svaki od proizvođača opreme i omogućuju precizniju i kvalitetniju kalibraciju. Neki od elektrolučnih procesa daju stabilniji luk i izmjerene vrijednosti ne variraju (realne su) kao recimo TIG proces zavarivanja, dok neki postupci zavarivanja daju nestabilniji električni luk i vrijednosti dosta variraju (MAG, REL), pri tome je umjeravanje s upaljenim el. lukom jako otežano bez

primjene kalibratora koji na otporniku narinu određene vrijednosti napona i s tim se očitavaju određene vrijednosti jakosti struje pri čemu nije došlo do uspostave električnog luka.

**Tablica 2.** Validacijska točnost zadanih vrijednosti [4]

Mjerenje	Tip mjernog instrumenta	Standardni razred	Referenca	Raspon validacije
Struja	Standardno	$\pm 2,5 \%$	od najviše postavljene vrijednosti	ispod 25% najviše postavljene vrijednosti
		$\pm 10 \%$	od referentne vrijednosti	25% do 100% najviše postavljene vrijednosti
	Precizno	$\pm 1 \%$	od najviše postavljene vrijednosti	ispod 40% najviše postavljene vrijednosti
		$\pm 2,5 \%$	od referentne vrijednosti	40% do 100% najviše postavljene vrijednosti
Napon	Standardno	$\pm 2,5 \%$	od najviše postavljene vrijednosti	ispod 25% najviše postavljene vrijednosti
		$\pm 10 \%$	od referentne vrijednosti	25% do 100% najviše postavljene vrijednosti
	Precizno	$\pm 2 \%$	od najviše postavljene vrijednosti	ispod 40% najviše postavljene vrijednosti
		$\pm 5 \%$	od referentne vrijednosti	40% do 100% najviše postavljene vrijednosti
Brzina dodavanja žice	Standardno	$\pm 2,5 \%$	od najviše postavljene vrijednosti	ispod 25% najviše postavke
		$\pm 10 \%$	od referentne vrijednosti	između 25% i 100% najviše postavke
	Precizno	$\pm 2,5 \%$	od najviše postavljene vrijednosti	ispod 40% najviše postavke
		$\pm 6,25 \%$	od referentne vrijednosti	između 40% i 100% najviše postavke

### 3. Umjeravanje opreme za zavarivanje

Uređaji za zavarivanje uz sebe posjeduju i specifikacije koje definiraju razinu odstupanja parametara zavarivanja. Prema tim specifikacijama vrši se mjerenje parametara zavarivanja te njihova korekcija. Prije početka mjerenja parametara zavarivanja uređaj je potrebno pregledati ima li određenih oštećenja, nakon toga mjeri se napon praznog hoda te uvjeti u kojima uređaj radi temperatura i relativna važnost u prostoriji. Na slici 1 prikazana je oprema koja nam omogućuje mjerenje relativne vlažnosti i temperature, te digitalni multimeter.



a)



b)

**Slika 1.** Mjerni uređaji a) termohigrometar –  $\pm 1^\circ\text{C}/ \pm 10\%$ , multimeter (FLUKE 376) -  $\pm 3\%$





Za provedbu mjerenja potrebna je osoba koja upravlja izvorom struje za zavarivanje te druga osoba koja vrši očitavanje i zapis mjerenih vrijednosti u Izvještaj o verifikaciji opreme za elektrolučno zavarivanje certifikat. Ukoliko postoji određenih odstupanja potrebno je iste navesti kao ograničenja uređaja (korekcijska tablica parametara) koja mora biti u certifikatu uređaja te postavljena na vidljivo mjestu uz izvor struje za zavarivanje. Sve navedeno provjerava i ovjerava odgovorni IWE pri čemu uređaj dobiva određeni status „Provjeren sa zadovoljavajućim nalazom ili neispravan!“ Prije početka mjerenja uređaj mora biti u radnom prostoru u kojem se i inače koristi te mora raditi u praznom hodu minimalno 30 minuta. Za različite procese zavarivanja provjeravaju se različite vrijednosti te se određuje različiti broj ponavljanja

Veličine koje se provjeravaju kod uređaja za zavarivanje pri TIG (ručnom) i REL postupku zavarivanja su:

- napon praznog hoda uređaja  $U_0$ ,
- struja u V područja područjima: I. 65-110 A, II. 110-145A, III. 140-180A, IV. 180-230A, V. 230-300A ili maksimalna vrijednost za uređaj.

Pravilno mjerenje struje na uređaju za zavarivanje TIG i REL procesom zavarivanja prikazano je na slici 2, pri čemu se mjerenje provodi na 5 mjernih područja.



**Slika 2** Mjerenje struje na TIG i REL uređaju

Prema maksimalnoj jakosti struje određuje se dopušteno maksimalno odstupanje uređaja što je u ovome slučaju 2,5%, dok za napon najveće dozvoljeno odstupanje iznosi  $\pm 1,5$  V.

Ukoliko su sve izmjerene vrijednosti prihvatljive na uređaj se lijepi naljepnica sa potpisom odgovorne osobe i datumom umjeravanja u slučaju određenih nesukladnosti na uređaj se lijepi naljepnica "NEISPRAVNO" a uređaj se šalje na popravak.

Kao i kod uređaja za zavarivanje tako i kod uređaja (peći) za sušenje elektrode i zaštitnog praška umjeravanje se vrši prema zahtjevima proizvođača elektrode i zaštitnog praška za zavarivanje.

Procedure provođenja i propisani uvjeti su isti kao i kod uređaja za zavarivanje samo se ovdje pri mjerenju koriste: termoparovi tipa K, termohigrometar i digitalni termometri sa sondom. Na početku mjerenja treba osigurati da je peć prazna te izmjereni početne vrijednosti vlage i temperature te vrijednosti napona napajanja same peći, nakon toga se vrši mjerenje u najmanje jednoj točki na peći ili najviše tri točke u ovisnosti o građi i izvedbama same peći. Dozvoljeno odstupanje pri najmanje tri mjerenja u trajanju od 30 minuta iznosi  $-25\text{ }^{\circ}\text{C} / +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

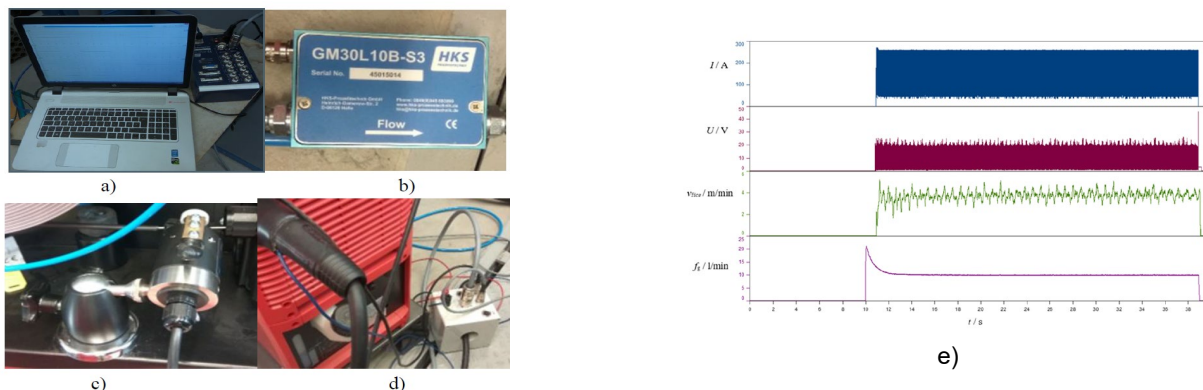
Kao i kod uređaja za zavarivanje prema dozvoljenim odstupanjima na peći se lijepi naljepnice o ispravnosti ili neispravnosti peći.



Slika 3. Mjerenje temperature u peći za sušenje elektroda

#### 4. On-line monitoring sustavi

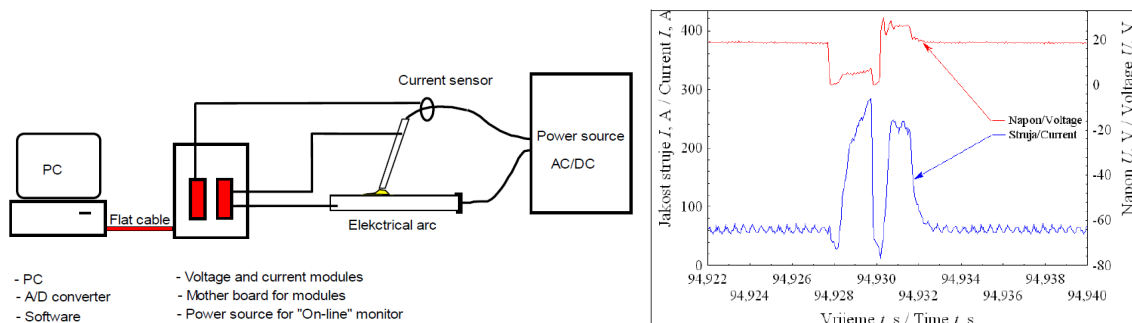
Za mjerenje i analizu glavnih parametara elektrolučnih procesa zavarivanja a u svrhu dobivanja točnijih podataka o procesu zavarivanja i mogućnosti djelovanja na postizanje što bolje kvalitete zavarenoga spoja koristi se različita oprema koja što je uređaj WeldAnalyst. Frekvencija snimanja parametara je 10870 Hz. Na slici 4 prikazane su snimljene karakteristike svih parametara (jakost struje, napon, brzina žice, protok plina). Uređaj je karakterističan po tome što ima mogućnost brzog snimanja podataka te može snimati do 1 MHz podataka. Za spajanje različitih senzora uređaj ima 12 analognih kanala.



Slika 4. Mjerenje parametara zavarivanja a) WeldAnalyst-S3 device, b) mjerac protoka plina, c) mjerenje brzine žice, d) mjerenje struje i napona, e) izgled izmjerenih vrijednosti

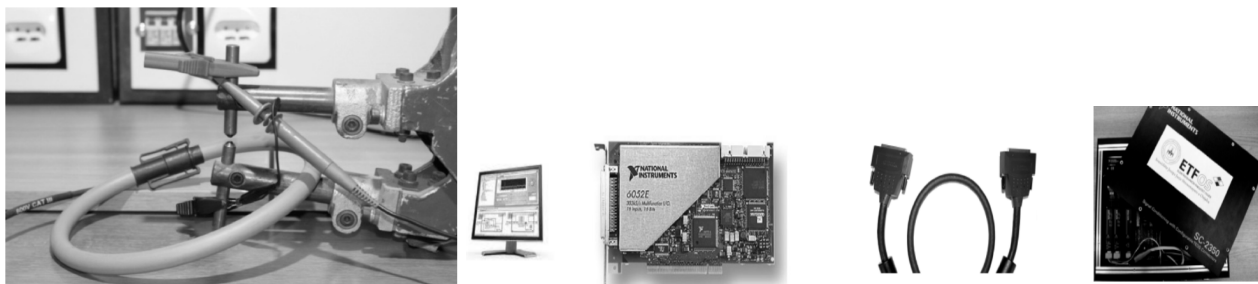
[1]

Na slici 5 prikazan je On-line sustava za praćenje, prikupljanje i obradu glavnih parametara zavarivanja, ovi sustavi se upotrebljavaju za različite postupke zavarivanja. Omogućuje se analiza glavnih parametara i analiza utjecaja na kvalitetu zavarenih spojeva.



**Slika 5** Uređaj za mjerenje on-line parametara i rezultati mjerenja [5]

Sustavi za kontrolu glavnih parametara zavarivanja ne razvijaju se samo za elektrolučne procese zavarivanja njihov razvoj i primjene moguća je i na elektrootpornim procesima zavarivanja. Na slici 6 prikazan je sustav primjenjivan na elektrootpornom točkastom zavarivanju.



**Slika 6** Mjerenje glavnih parametara zavarivanja kod točkastog zavarivanja

## 5. Zaključak

Redovito umjeravanje opreme doprinosi održavanju potrebne kvalitete pri izvođenju zavarivačkih radova u proizvodnom procesu. Umjeravanje se mora provoditi u skladu s normom HRN EN IEC 60974-14 kako bi se na pravilan način mogla koristiti oprema. Osim propisanih procedura navedenih u normi za praćenje i analizu razvijaju se različiti sustavi za on-line monitoring parametara zavarivanja koji omogućuju kvalitetniju analizu glavnih parametara te postizanje kvalitetnijih zavarenih spojeva razvoj novih modela za rano otkrivanje i sprečavanje pojave grešaka.

## 6. Literatura

- [1] I. Dunder, Z. Tonković, P. Konjatić, D. Marić, A. Konjatić, M. Dunder: Development of a model for assessing the quality of welded joints, 12. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2023, STROJARSKE TEHNOLOGIJE U IZRADI ZAVARENIH

KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, SBZ 2023.“ Slavonski Brod, 26. i 27. 04. 2023. i Požega 28. 04. 2023. 186-196

- [2] Garašić, I.; Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje. FSB, Zagreb, 2016.
- [3] HRN EN ISO 17762:2016: Welding - Calibration, verification and validation of equipment used for welding, including ancillary activities
- [4] HRN EN IEC 60974-14: Arc welding equipment - Part 14: Calibration, validation and consistency testing
- [5] T. SIEWERT, I. SAMARDŽIĆ, Z. KOLUMBIĆ. Primjena on-line monitoring sustava za praćenje glavnih parametara zavarivanja kod različitih postupaka zavarivanja. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje, TEHNOLOGIČNA PRIMJENA POSTUPAKA ZAVARIVANJA I ZAVARIVANJU SRODNIH TEHNIKA U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, Slavonski Brod, 14. – 16. studeni 2007. 1-22.
- [6] D. ŠOŠTARIĆ, D. VINKO, D. ŽAGAR, I. SAMARDŽIĆ. Reliability of Welding Parameters Monitoring System. Strojstvo 52 (2) 217-226 (2010)



# Optimization of Steel Watchtower Structure Using Eurocode 3 and Robot Structural Analysis

M.Vilić<sup>1,\*</sup>, J.Marijić<sup>1</sup>, I.Grgić<sup>1</sup>, M.Karakašić<sup>1</sup>, Ž.Ivandić<sup>1</sup>, D.Mačinković<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [mvilic@unisb.hr](mailto:mvilic@unisb.hr)

## Abstract

This paper examines the optimisation process of steel watchtower structure, focusing on the integration of Eurocode 3 standard and the advanced features of Robot Structural Analysis software. Eurocode 3 provides a comprehensive set of guidelines for the design of steel structures that ensure safety, reliability and cost efficiency. By utilising these standards, we aim to improve the structural performance and material utilisation of watchtower structure. Our approach involves detailed analysis of various design parameters, including load-bearing capacity, stability and dynamic response to environmental factors such as wind. Using Robot Structural Analysis, we perform a series of simulations to determine the optimal configurations that meet the stringent criteria of Eurocode 3.

The results show a significant improvement in structural efficiency with reduced material costs and increased safety margins. This study not only underlines the importance of compliance with international standards, but also demonstrates the potential of modern calculation tools to revolutionise construction.

Key findings and recommendations for the practical implementation of these optimised designs in real-life scenarios are discussed. This research contributes to ongoing efforts to advance the field of structural engineering through innovative methods and cutting-edge technology.

**Key words:** Structural optimisation, Eurocode 3, Robot Structural Analysis, Structural Engineering, Simulation

## 1. Introduction

### Background

Steel watchtower structures are integral components in various fields such as telecommunications, forestry and surveillance. These towers are designed to be robust, durable and withstand various environmental stresses [1]. The design and optimisation of such structures are crucial to ensure safety, functionality and cost efficiency. Optimisation is about improving the design to achieve the desired performance criteria while minimising material consumption and costs [2].



Eurocode 3 is a comprehensive set of standards for the design of steel structures in Europe. It provides guidelines for the design of structures to ensure safety, reliability and efficiency. Applying Eurocode 3 in the design process ensures that structures fulfil the required safety standards and performance criteria [3].

Robot Structural Analysis is a powerful software tool used in civil engineering for modelling, analysis and design of structures. It offers advanced functions for the simulation of real conditions and is therefore an invaluable tool for the optimisation of structures [2].

#### Objective

The main objective of this study is to optimise the design of a steel watchtower using Eurocode 3 and Robot Structural Analysis. The specific objectives are:

- Develop an efficient structural model of a steel watchtower using Robot Structural Analysis.
- Apply Eurocode 3 standards to ensure that the design fulfils all safety and performance requirements.
- Implement optimisation techniques to minimise material usage and overall cost without compromising structural integrity.
- Evaluate the performance of the optimised structure under different loading conditions.

#### Scope

This study focuses on the optimisation of steel watchtower structures, with an emphasis on compliance with Eurocode 3 standards and the use of Robot Structural Analysis capabilities. The optimisation process includes modelling, load analysis and improvement of the structural design. The study does not cover other materials or non-steel structures and is limited to the specific Eurocode 3 standards.

#### Significance

The optimisation of steel watchtower structures has a significant impact on safety, cost efficiency and resource management. By complying with Eurocode 3 standards, this study ensures that the optimised design is both safe and reliable. The use of robotic structural analysis facilitates detailed and accurate analysis and leads to more efficient designs. The results of this study can be applied to similar structures in different industries, contributing to better design practises and more sustainable engineering solutions.

In summary, this study aims to demonstrate the effectiveness of combining Eurocode 3 standards with advanced structural analysis software to obtain optimised designs for steel watchtowers. Through rigorous analysis and optimisation, the study aims to contribute to the field of structural engineering by providing a comprehensive methodology for the design of safe and efficient steel watchtower structures.

## 2. Methodology

Steel grade S355 was used for the steel structure of the watchtower, which is known for its high strength and durability and is therefore suitable for applications where a high load-bearing capacity is required. The selection of profiles for the structural elements was based on the "Stahlbau Profile 22. Auflage" catalogue, which contains a comprehensive range of steel profiles commonly used in building construction [2].

The design and analysis was based on various European standards to ensure compliance with safety and performance requirements shown in Table 1:

**Table 1.** Relevant Eurocodes and their applications [3] [4] [5] [6]

Eurocode	Application
EN 1991	Determination of weight loads
EN 1993-1-3	Design of steel connections
EN 1990	Combination of loads
EN 1991-1-4	Wind load assessment

Robot Structural Analysis was used to model, analyse and optimise the steel structure of the watchtower. The optimisation process involved several important steps:

Detailed 3D model of the steel watchtower was created using Robot Structural Analysis. Various load cases were defined based on the Eurocode 1 and EN 1991-1-4 standards. These included dead loads, live loads and wind loads. The load combinations were defined in accordance with EN 1990 to ensure that the structure could withstand multiple load scenarios. The structure was analysed under the defined load cases and combinations to assess its performance. All of the above mentioned can be observed on Figure 1. The analysis focussed on identifying areas of high stress, potential deflections and overall stability. The profiles were selected from the "Stahlbau Profile 22. Auflage" catalogue. During the selection process, a balance between structural performance and material efficiency was considered to ensure that the selected profiles provided sufficient strength while minimising weight. The steel connections were designed in accordance with EN 1993-1-3 to ensure that all connections could effectively transfer the loads between the structural elements. The original design was subjected to an optimisation process to improve its efficiency. This involved iterative adjustments to profile sizes, connection details and structural layout to achieve an optimum balance between strength, weight and cost. The optimised design was assessed to ensure that all relevant standards and regulations were met. The final design was then documented, highlighting the improvements in terms of material usage, structural performance and overall efficiency. Figure 1. c) shows load combinations resulting from the combination of the load types listed in Table 2. The load combinations are divided into two groups: ULS (ultimate limit state) and SLS (serviceability limit state). ULS is used to determine whether the steel structure has the correct stability and stress level, and SLS to determine whether the displacements are in the correct range, which is normally for beam length/250 and for column length/150. Load types 1-4 all act in the -z direction, as shown in Figure 1. a). All load combinations and partial safety factors are created automatically using software according to EN 1990.

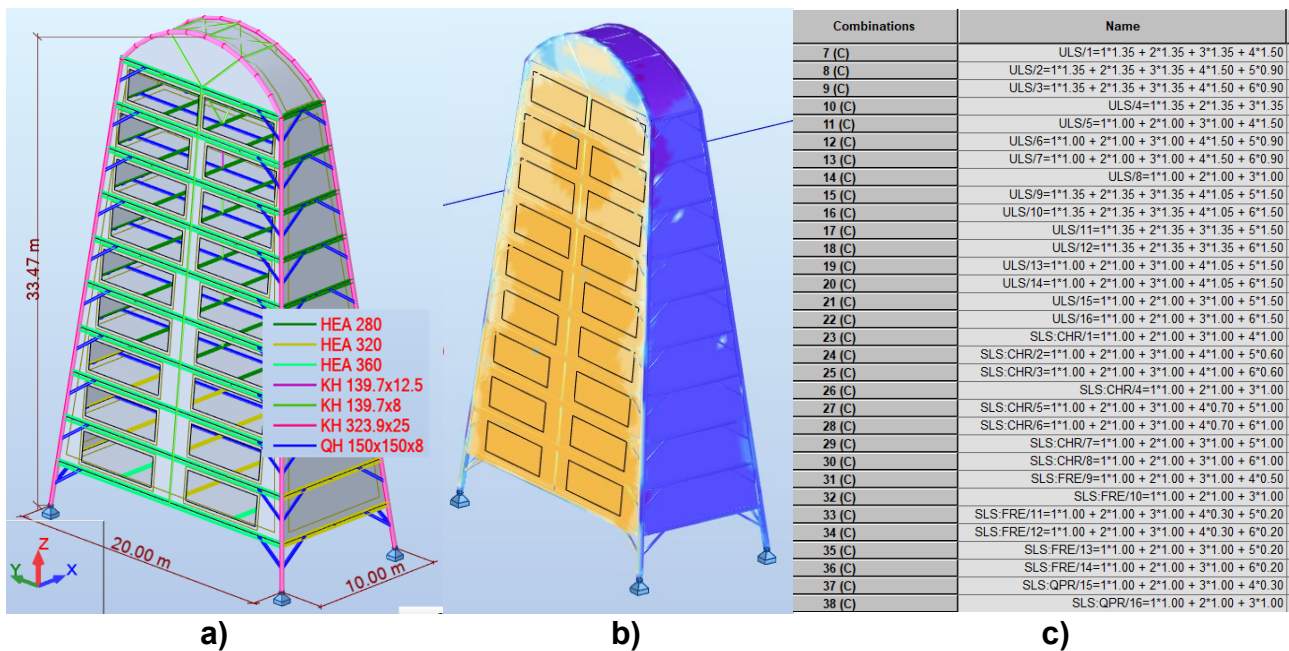


Figure 1. a) 3D model, b) wind load, c) combinations of loads

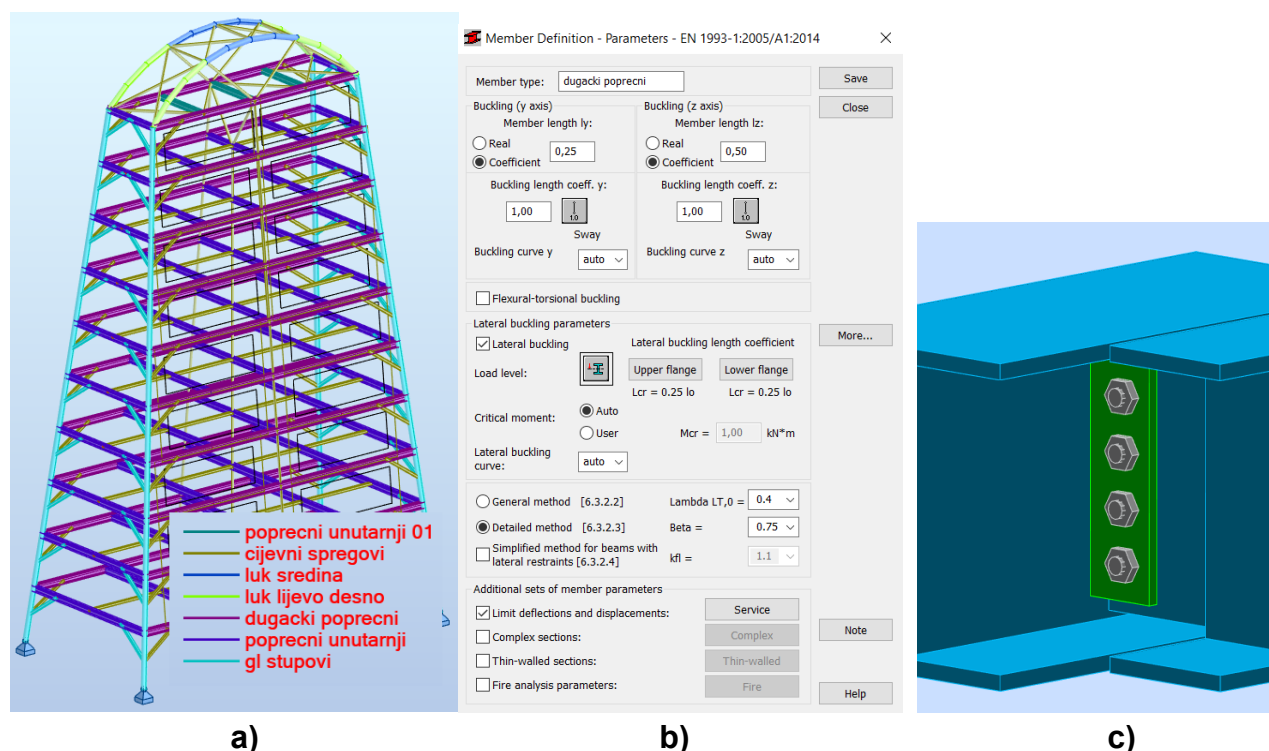
In Robot Structural Analysis, the definition of member types is of crucial importance for the precise assessment of the buckling properties of different profiles. By specifying the member types, the software can apply the appropriate buckling length coefficients and effective lengths. As can be seen in Figure 2, the member types are defined in such a way that includes the definition of lateral and axial buckling parameters.

The loads acting on the structure were defined in accordance with Eurocode 1 and other relevant standards are shown in Table 2. The primary loads considered include the self-weight of the structure, cladding loads, equipment loads, live loads and wind loads. The load values were determined based on standard guidelines and practical considerations for the intended use of the watchtower.

Table 2. Load definitions

Load types	Load name	Description	Value [kg/m <sup>2</sup> ]
1	Self-Weight	Weight of structure itself	Calculated by software
2	Cladding load	Flooring and wall cladding	250
3	Equipment load	Various equipment	250
4	Live load	People	250
5	Wind load	Wind in X direction	Calculated by software
6	Wind load	Wind in Y direction	Calculated by software





**Figure 2.** a) member types, b) member type definition, c) shear connection HEA 360-HEA 360

The steel structure used pinned boundary conditions (freely rotatable around the x-, y-, z- axis, not freely movable in the x-, y-, z- axis) for all load combinations

### 3. Results and Discussion

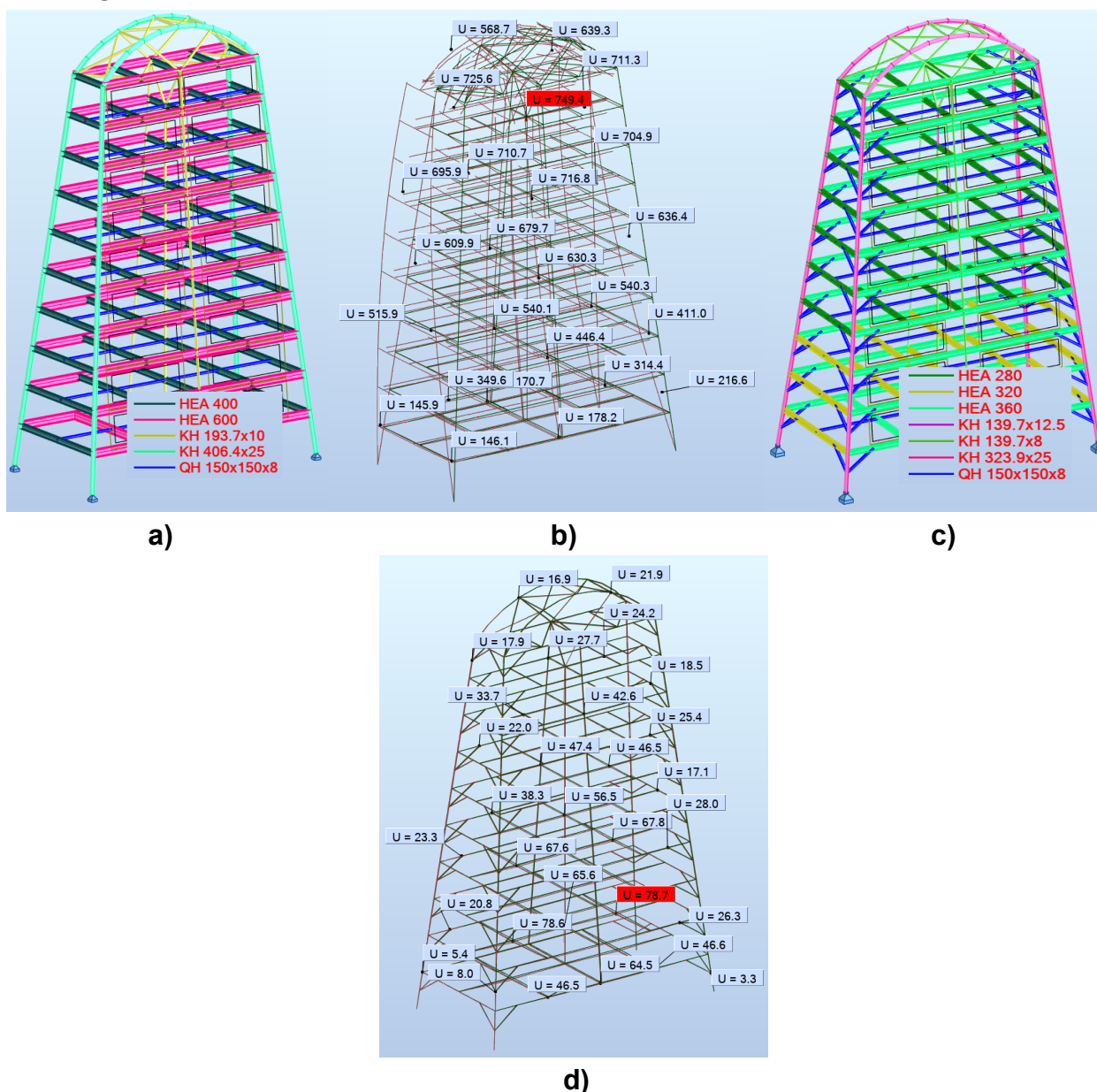
The original design of the steel watchtower had a total weight of 150 tonnes. This design was evaluated under various load combinations and it was found that the structure experienced excessive lateral displacements. Displacements were evaluated as overall displacements (combination of x-, y-, z- displacements) for SLS load combinations 23 to 38. In some load combinations displacements exceeded 700 mm, which was considered unacceptable for the structural integrity and functional performance of the tower.

In order to eliminate the excessive displacements, it was first important to increase the structural rigidity [7]. The chosen approach was to make the corners of the watchtower moment-resisting. This modification was chosen to maintain the unobstructed view and avoid the use of additional bracing that would compromise the visual aspect of the structure. By introducing moment-resisting connections at the corners, the lateral stiffness of the structure was significantly improved, resulting in a reduction in displacements. This adjustment allowed us to further optimise the design.

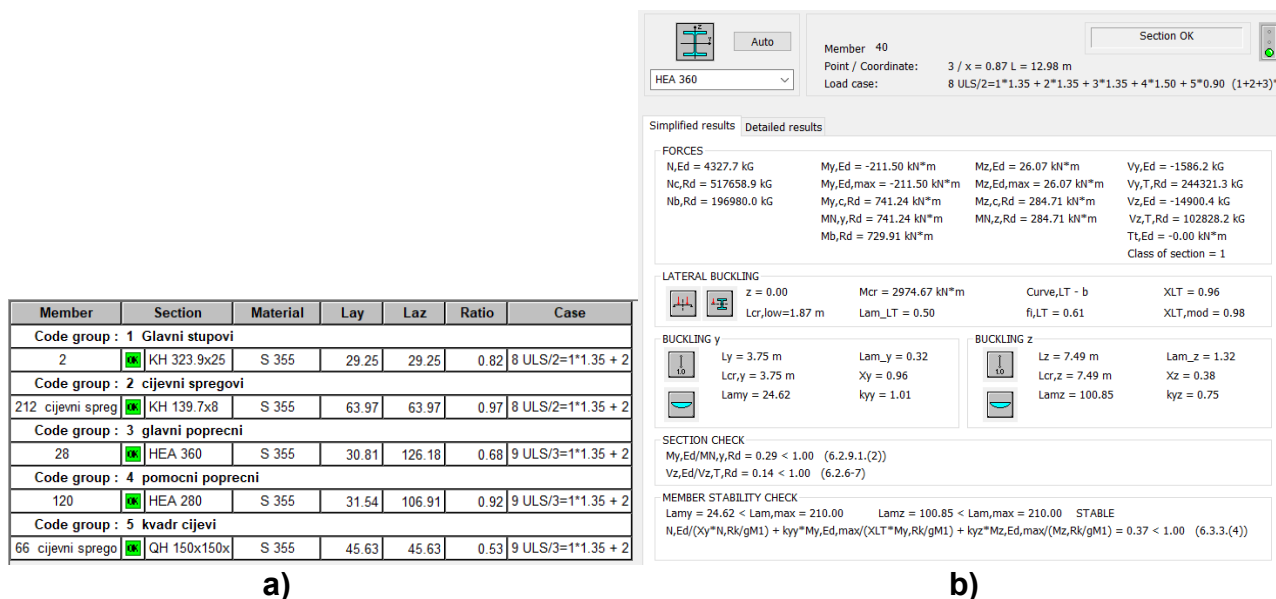
To improve the optimisation process, special functions of Robot Structural Analysis, such as advanced member properties and releases, were used. These functions include:

Advanced member properties: These properties allowed profiles to be configured to resist axial forces only. By setting the profiles to only support axial loads and release moments, the profiles could be reduced in size without compromising their load-bearing capacity.

Releases: The start and end points of the beams were configured to carry either moments or axial and shear forces, depending on the design requirements. In this way, we were able to avoid the transfer of bending moments to the main columns. Figure 3 shows a side-by-side comparison of the original and optimized designs, highlighting the improvements in profile sizes and displacements. The steel structure members were divided into 5 code groups shown in Figure 4. These 5 groups were checked for stability and stress utilisation for the ULS load combinations 7-22.



**Figure 3.** a) original structure, b) overall displacements of original structure, c) optimized structure, d) overall displacements of optimized structure



**Figure 4.** a) steel structure members code groups , b) example of stability and stress check of a steel member

The optimisation process led to a significant reduction in structural weight (before 150t, after 110t) and an improvement in the performance of the watchtower. By addressing the excessive displacements with moment-resisting corners and using advanced member properties for optimisation, the final design achieved a balance between structural efficiency and visual requirements.

By utilising moment resisting connections, the functional and aesthetic aspects of the watchtower were maintained whilst ensuring compliance with the displacement limits. The downsizing of the profiles combined with advanced modelling capabilities enabled the creation of a lighter and more cost-effective structure without compromising safety.

#### 4. Conclusion

This paper examines the optimisation process of a steel watchtower structure, focusing on the integration of Eurocode 3 standards and the advanced features of Robot Structural Analysis software. Eurocode 3 provides a robust framework for the design of steel structures that ensures safety, reliability and cost efficiency. Our aim was to use these standards to improve the structural performance and material utilisation of the watchtower.

The study began with an analysis of the original design, which weighed 150 tonnes and had excessive lateral displacements of more than 700 mm for some load combinations. To address these issues, the approach focussed on increasing the structural rigidity by implementing moment resisting connections at the corners of the watchtower. This modification, which can be seen in Figure 3, significantly improved the lateral stiffness and reduced the displacements, allowing further optimisation.

After solving the displacement problems, the next phase was to reduce the size of the profiles to create a lighter structure. For this, the advanced features of Robot Structural Analysis were utilised, including:

**Advanced Member Properties:** Profiles were configured to resist only axial forces, enabling the use of smaller profiles without compromising the load-carrying capacity.

**Releases:** The start and end points of the beams were adjusted to efficiently manage moments and forces and avoid unnecessary bending moments being transferred to the main columns.

Figure 3 shows the optimised design with reduced profile sizes and improved beam properties. The optimisation resulted in a significant weight reduction from 150 tonnes to 110 tonnes. The final design achieved a balance between structural efficiency and visual requirements, maintaining functional and aesthetic aspects while improving overall performance.

The results underline the importance of compliance with international standards and the potential of modern structural analysis tools to revolutionise construction practise. By combining Eurocode 3 standards with advanced software features, this study contributes to the continuous evolution of construction through innovative design methods and cutting-edge technology.

In summary, the optimisation process has demonstrated effective strategies to improve structural performance and reduce material costs. The final design not only fulfils the stringent criteria of Eurocode 3, but also illustrates the benefits of integrating advanced structural analysis tools into the design process. This research provides valuable insights for future applications in construction and demonstrates the potential for further improvement and innovation in this area.

## 5. Literature

- [1] IndiaMART. (n.d.). *Steel Watchtower*. Retrieved from <https://www.indiamart.com/proddetail/steel-watchtower-19477532173.html>
- [2] Autodesk. (2024). Robot Structural Analysis 2024 Help. Retrieved from <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2024/ENU/>
- [3] European Committee for Standardization. (2006). *EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-3: General Rules of Structural Design of Steel Structures*. CEN
- [4] European Committee for Standardization. (2002). *EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-1: General Rules*. CEN
- [5] European Committee for Standardization. (2002). *EN 1990: Eurocode: Basis of Structural Design*. CEN
- [6] European Committee for Standardization. (2005). *EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-4: Wind Actions*. CEN
- [7] Vilić, M., Marijić, J., Grgić, I., Karakašić, M., & Ivandić, Ž. (2023). *Comparison of Fillet Weld Calculations Using Softwares IDEA StatiCa and Abaqus CAE*. In 12th International Scientific-Professional Conference SBZ 2023, "Strojarske tehnologije u izradi zavarenih konstrukcija i proizvoda". Slavonski Brod: Sveučilište u Slavonskom Brodu, pp. 346-352.

# **Tensile Shear Strength of a Bonded Joint of 3D Printed PLA Using Dissolved ABS**

**I. Grgić<sup>1,\*</sup>, J. Marijić<sup>1</sup>, M. Vilić<sup>1</sup>, M. Karakašić<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, University of Slavonski Brod, Slavonski Brod, Croatia

\*Corresponding Author. E-mail: [igrbic@unisb.hr](mailto:igrbic@unisb.hr)

## **Abstract**

This study investigates the effectiveness of using ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) dissolved in acetone as an adhesion promoter for PLA (Polylactic Acid) and examines the resulting tensile shear strength of the compounds. The PLA samples were 3D-printed and prepared in accordance with the ISO 4587 standard to ensure the uniformity of the test specimens. The bonding surfaces of the PLA samples were cleaned and slightly roughened to improve adhesion. An ABS solution in acetone was applied to these surfaces, which were then joined and cured very fast under finger pressure. Tensile tests were carried out using a Universal Testing Machine (UTM) to measure the maximum force the bonded joints could withstand before failing. The tests were carried out at a constant crosshead speed of 5 mm/min. The tensile shear strength was calculated by dividing the maximum force by the cross-sectional area of the bonded joint. The results showed that the bonded joints had considerable tensile shear strength, but this was generally lower than the tensile shear strength of the PLA material itself due to possible imperfections in the bond line. This study highlights the potential of using dissolved ABS as an adhesive.

**Keywords:** Tensile Shear Strength, PLA, ABS, Bonded Joint;

## **1. Introduction**

In recent years, additive manufacturing, particularly Fused Deposition Modeling (FDM), has revolutionized the way complex structures are designed and produced. One of the most widely used materials in FDM is Polylactic Acid (PLA), known for its biodegradability, ease of use, and relatively high strength [1]. However, the mechanical integrity of PLA components can be compromised at the joints, where bonding techniques play a crucial role in maintaining structural performance [2].

Traditional mechanical fastening and adhesives often fall short in achieving the required strength and durability for 3D printed joints [3]. This has led to increased interest in exploring alternative bonding methods that can seamlessly integrate with the 3D printing process. One promising approach involves the use of dissolved Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) for chemical treatment that “melts” the surface of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene parts, resulting in a smooth surface finish [4]. Similar study to this one

was presented in [5]. Authors investigated the adhesive joining of dissimilar 3D-printed parts made from usually preferred materials (Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polylactic Acid (PLA)) having different geometric joint designs (lap, scarf, stepped) employing diverse adhesives (epoxy, cyanoacrylate, polyurethane-based) subjected to different surface treatments (sanding, vapor, plasma). The results revealed the significance of the process parameters in the following order: material type, joint configuration, adhesive types, and surface pre-treatments. The preferred material turned out to be ABS + ABS, with stepped configuration, subjected to plasma treatment and bonded with Loctite adhesives giving a strong improvement in terms of performance.

The advancement of additive manufacturing processes, such as 3D printing, has revolutionized the way we design and produce various components and parts. One critical aspect of 3D printing is evaluating the mechanical properties of the printed materials and their bonded joints. In this study, the focus was on the investigation of the tensile shear strength of a bonded joint of 3D printed Polylactic Acid (PLA) using dissolved Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) as a bonding agent. Understanding the tensile shear strength of bonded joints is crucial for assessing the structural integrity and reliability of 3D printed components in various applications, ranging from prototyping to functional part production. By exploring the bonding capabilities of dissimilar materials like PLA and dissolved ABS, the aim was to shed light on the mechanical behavior of these joints under tensile loading conditions. This research delves into the factors influencing the bonding strength, such as surface preparation, bonding agent formulation, and printing parameters. Through experimental analysis and mechanical testing, we seek to provide valuable insights into optimizing the bonded joint strength of 3D printed PLA components using dissolved ABS, ultimately contributing to the enhancement of additive manufacturing processes.

## 2. Materials and Methods

For this study, a Qidi Tech X-MAX FDM 3D printer (Fig. 1) was used for 3D printing with rough magnetic plate (Fig. 2) to ensure surface roughness in advance in terms of surface preparation for bonding according to ISO 4587. PLA and ABS (PLASTIKA TRČEK, A grade – 100% original, biodegradable and innocuous, White, 1,75 mm) material was used for 3D printing (PLA) and dissolving (ABS). Ultimaker Cura 5.1.1 slicer software was used for 3D printing preparation [6]. All models were printed with the following parameters shown in Table 1 and are based on material's, 3D printer's, slicer software's default specifications.



Figure 1. FDM 3D Printer

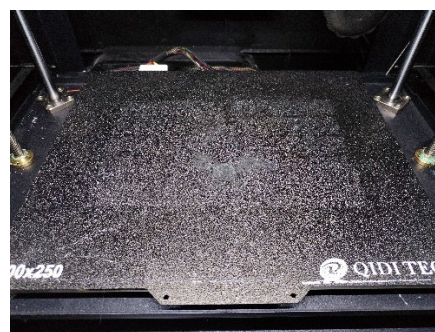
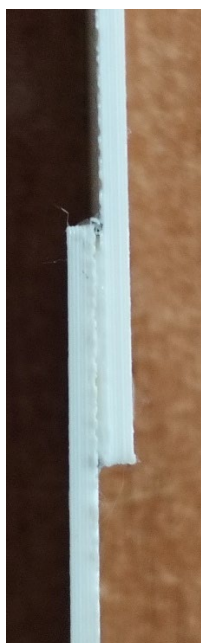


Figure 2. Textured magnetic plate

**Table 1.** 3D printing parameters

Nozzle temperature(°C)	200
Bed temperature (°C)	45
Layer height (mm)	0,2
PLA Diameter (mm)	1,75
Infill (%)	100
Pattern	Lines
Printing Speed (mm/s)	50
Fan settings (all layers) (%)	100
Layer Orientation (°)	±45
Number of perimeters	1
Nozzle diameter (mm)	0,4

50 millilitres of Acetone and 15 grams of ABS were mixed and left 24 hours to get an ABS glue. 10 specimens, usually dimensioned with an overlap area of 12,5 mm × 25 mm, were aligned and the ABS glue was applied with a brush and pressed together by hand to ensure good contact (Fig. 3). After curing, the specimens were inspected for defects and measured to ensure compliance with specified dimensions. The curing time was very fast, and it lasted just a few minutes. The experiments were conducted using a Shimadzu AGS-X 10 kN machine. The setup preparation is presented on Figure 4. The gauge length was set to 112 mm with the test speed of 5 mm/min



**Figure 3.** Bonded joint.



**Figure 4.** Experiment setup.

### 3. Results

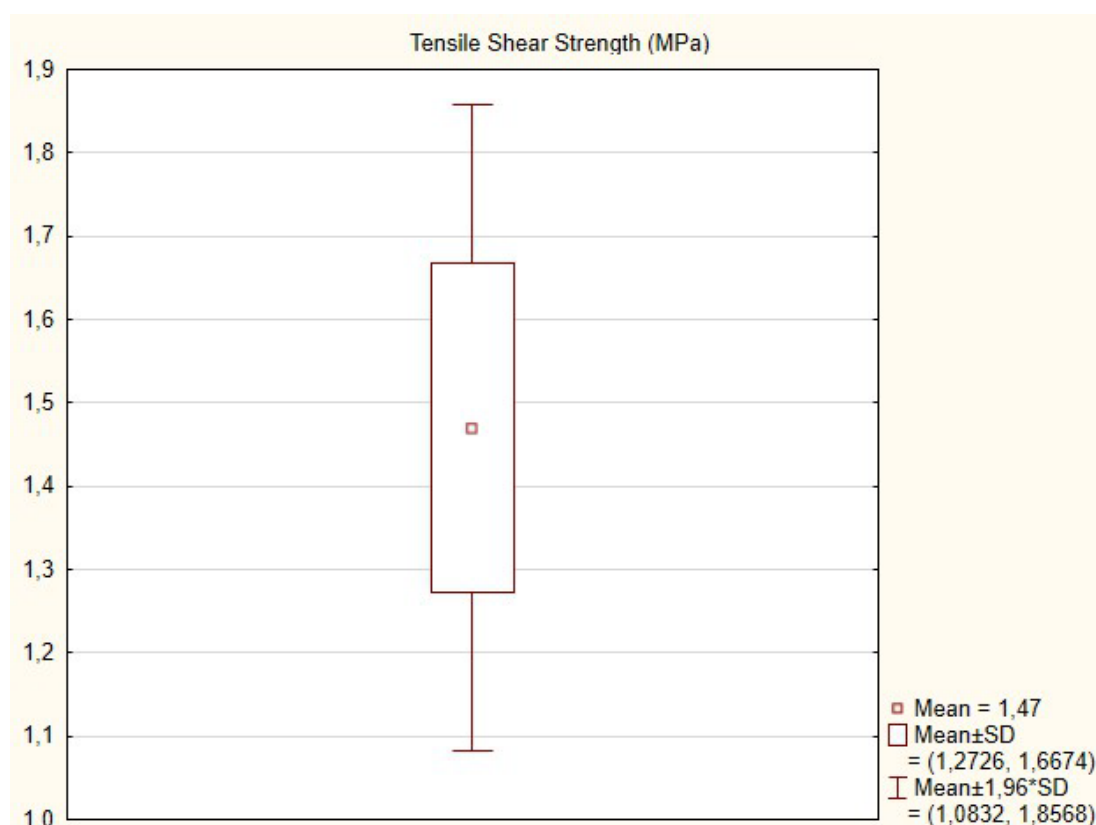
All of 10 specimens were failed at the bonded joint area. The tensile shear strength of the adhesive bonds was measured for ten specimens. Descriptive statistics for the tensile shear strength are summarized in Table 1. The mean shear strength was 1,47 MPa with a standard

deviation of 0,19 MPa, indicating a relatively consistent performance across samples. The minimum and maximum shear strengths observed were 1,18 MPa and 1,75 MPa, respectively.

**Table 2.** Raw data

Specimen ID	Force (N)	Stroke (mm)	Tensile Shear Strength (MPa)
L 1	548,75	1,05	1,75
L 2	458,58	1,03	1,46
L 3	534,76	1,13	1,70
L 4	445,40	0,97	1,18
L 5	375,21	1,03	1,20
L 6	504,44	1,14	1,61
L 7	412,72	1,09	1,32
L 8	435,65	1,08	1,39
L 9	472,34	1,07	1,51
L 10	495,96	1,07	1,58

As shown in the bar chart in Figure 5, most specimens had tensile shear strengths close to the mean, with only a few exhibiting slightly higher or lower values. This consistency suggests that the experiment preparation and application methods were effective. Diagrams of failure loads are presented below on Figure 6.



**Figure 5.** Tensile Shear Strength Box plot



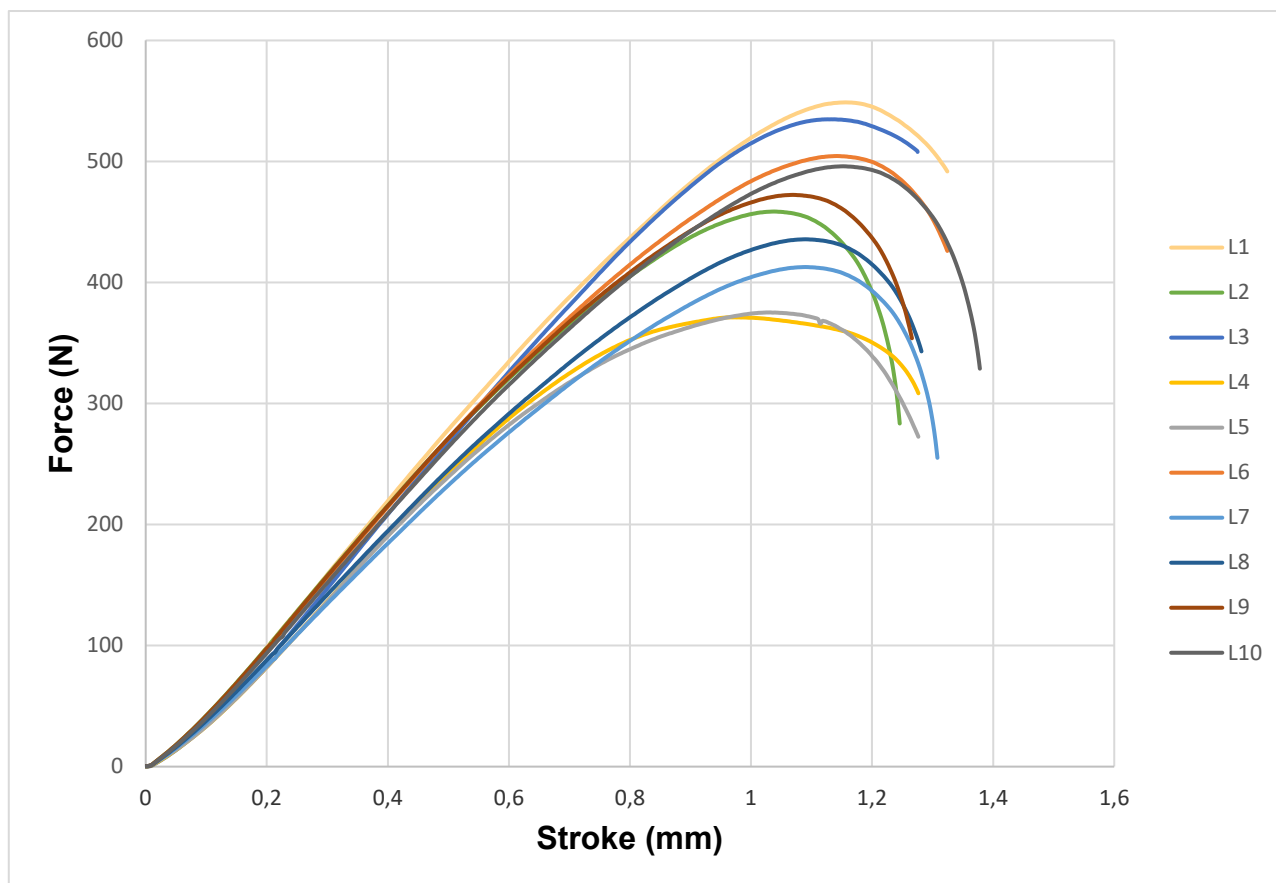


Figure 6. Tensile Shear test

#### 4. Conclusion

Authors in [5] reported that the average tensile shear strength was 2,79 MPa for Loctite, 0,83 MPa for Sikaflex and 1,95 MPa for Araldite as the adhesives in making sigle-lap joint for PLA+PLA, ABS+PLA and ABS+ABS material combinations. The average tensile lap-shear strength of 1,47 MPa is consistent with previous studies indicating that the ABS as the adhesive provides adequate bonding strength under the tested conditions. However, the observed adhesive failures suggest potential improvements in surface preparation techniques to enhance bonding strength further. An important aspect of this study is the consideration of build plate size in additive manufacturing processes. The build plate size often limits the maximum dimensions of parts that can be printed as a single piece. In many applications, particularly in the aerospace and automotive industries, components required are larger than the available build volume of standard 3D printers. As a result, it becomes necessary to print parts in smaller sections and subsequently join them to form a single, larger component. This practice introduces several challenges and considerations in the context of adhesive bonding. Firstly, the bonding surfaces must be prepared meticulously to ensure strong adhesion. Secondly, the design of the bonding joints plays a crucial role. Single-lap joints, as tested in this study, are common due to their simplicity and effectiveness. However, the design of the overlap area, adhesive layer thickness, and curing conditions must be optimized to achieve the best results. In practice, ensuring uniform adhesive distribution and preventing voids or air pockets during the assembly process are essential for maximizing bond strength.

Furthermore, the necessity to join printed parts introduces additional variables such as the alignment of parts, clamping pressure, and the potential for misalignment, which can affect the overall structural integrity of the assembled component. Any deviations in these factors can lead to variations in bond strength and overall performance of the final assembled part. Lastly, the environmental conditions during the bonding process, including temperature and humidity, can influence the adhesive properties. For industrial applications, controlling these conditions is crucial to ensure the reliability and durability of the bonded joints. Our study adhered to standardized conditions, but real-world applications may require additional controls to account for environmental variability.

Future research could explore advanced surface treatment methods, optimized adhesive formulations, and improved joint designs to enhance the performance of ABS adhesively bonded components in additive manufacturing applications.

## 5. References

- [1] Ippolito, R., Iuliano, L., & Gatto, A. Additive Manufacturing and Mechanical Properties of 3D Printed Structures // *Materials*, 13(2020), 15, 3242.
- [2] Zhou, L., Zhang, S., Yang, J., & Li, X. A review on the impact of post-processing techniques on the mechanical properties of FDM-printed PLA parts. *Journal of Materials Science*, 57(2022), 5, 2601-2623.
- [3] Goh, G. D., Yap, Y. L., Tan, H. K. J., Sing, S. L., Yeong, W. Y., & Zhou, K. Process-structure-properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2020), 5, 347-375.
- [4] Torrado, A. R., & Shemelya, C. M. Effect of Acetone Vapor Polishing on the Strength and Fatigue Life of Fused Deposition Modeled ABS Parts // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(2019), 2, 35.
- [5] Tiwary VK, Padmakumar A, Malik V. Adhesive bonding of similar/dissimilar three-dimensional printed parts (ABS/PLA) considering joint design, surface treatments, and adhesive types // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022;236(16):8991-9002
- [6] UltiMaker, 'Cura 5.1.1 3D printing software'. Accessed: Mar. 10, 2023. [Online]. Available: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>

# Primjena suvremenih ugljičnih materijala u sustavima za iskorištavanje obnovljivih izvora energije Application of modern carbon materials in systems for the utilisation of renewable energy sources

S. Kladarić<sup>1,\*</sup>, A. Kolarević<sup>2</sup>, I. Kladarić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tehnički odjel, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Hrvatska

<sup>2</sup> Strojarški fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Hrvatska

\* Autor za korespondenciju. E-mail: [skladaric@unisb.hr](mailto:skladaric@unisb.hr)

## Sažetak

Ovaj rad sažeto predstavlja suvremene ugljične materijale koji su sve više zastupljeni u gotovo svim granama industrije zbog izuzetne kombinacije mehaničkih, fizikalnih, kemijskih i drugih svojstava koja posjeduju. Naglasak je stavljen na ugljikove strukture koje se koriste kao ojačala u proizvodnji kompozitnih materijala. Opisana je proizvodnja, struktura i svojstva ugljikovih vlakana te navedeni postupci proizvodnje kompozita ojačanih ugljikovim vlaknima. Također je opisana proizvodnja, struktura i svojstva ugljikovih nanocjevčica. U pregledu primjene spomenutih materijala naglasak je stavljen na primjere primjene u sustavima za iskorištavanje obnovljivih izvora energije.

**Ključne riječi:** grafen, ugljikova vlakna, ugljikove nanocjevčice, ugljični kompoziti

## Abstract

This article gives a brief introduction to modern carbon materials, which are increasingly used in almost all branches of industry due to their extraordinary combination of mechanical, physical, chemical and other properties. The focus is on carbon structures used as reinforcements in the manufacture of composite materials. The manufacture, structure and properties of carbon fibres are described, as are the manufacturing processes for carbon fibre reinforced composites. The production, structure and properties of carbon nanotubes are also described. The overview of the application of the materials mentioned focuses on examples of their use in systems for utilising renewable energy sources.

**Keywords:** graphene, carbon fibers, carbon nanotubes, carbon composites

## 1. Uvod

Suvremeni svijet karakterizira iznimno ubrzan tehnološki napredak, odnosno stalni razvoj novih tehnologija. Posljedica toga jest velika potreba za inovativnim materijalima koji mogu zadovoljiti zahtjeve modernih tehnologija. Brzi napredak u informacijskoj tehnologiji i

elektrotehnici stvara potrebu za laganim i čvrstim materijalima koji imaju izvanredna električna svojstva. Sve veći interes za iskorištavanjem obnovljivih izvora energije također traži nove materijale koji će osigurati visoku učinkovitost u pretvorbi energije te dugotrajnost, kako bi zadovoljili energetske potrebe modernog društva. Razvoj medicine zahtijeva biokompatibilne materijale za primjenu u implantatima i protezama koji se mogu integrirati u ljudsko tijelo. Najveći utjecaj na razvoj novih, lakih, čvrstih i visoko pouzdanih materijala stvara rastuća potražnja za vozilima s niskom emisijom štetnih tvari [1, 2, 3].

Kako bi ispunili zahtjeve za konkretne namjene, današnji znanstvenici i inženjeri smisleno kombiniraju različite tvari i materijale s ciljem proizvodnje novih materijala osobitih svojstava. Takva vrsta tehničkih materijala nazivaju se kompozitni materijali. Kompozitni materijali proizvode se umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe [1]. U drugoj polovini 20. stoljeća započeo je intenzivan razvoj i primjena kompozita ojačanih ugljikovim strukturama koji pripadaju skupini suvremenih ugljičnih materijala.

## 2. Ugljik

Ugljik je element koji se u prirodi pojavljuje u obliku elementarne tvari ili u raznim spojevima. Zbog svoje specifične elektronske konfiguracije, atomi ugljika imaju sposobnost spajanja, kako međusobno, tako i s atomima drugih elemenata što omogućuje stvaranje raznih kemijskih spojeva različite strukture. Ugljik je sastavni dio svih organskih tvari i temeljni građevni blok svih živih organizama. Mnogi tehnički materijali sadrže ugljik u svojoj strukturi, primjerice čelik, razni polimeri i slično.

Poznate su tri kristalne alotropske modifikacije ugljika, a to su grafit, dijamant i fuleren. Danas se smatra da svi oblici amornog ugljika, primjerice čađa i drveni ugljen, nisu čisti ugljik te da se sastoje od sitnih grafitnih čestica.

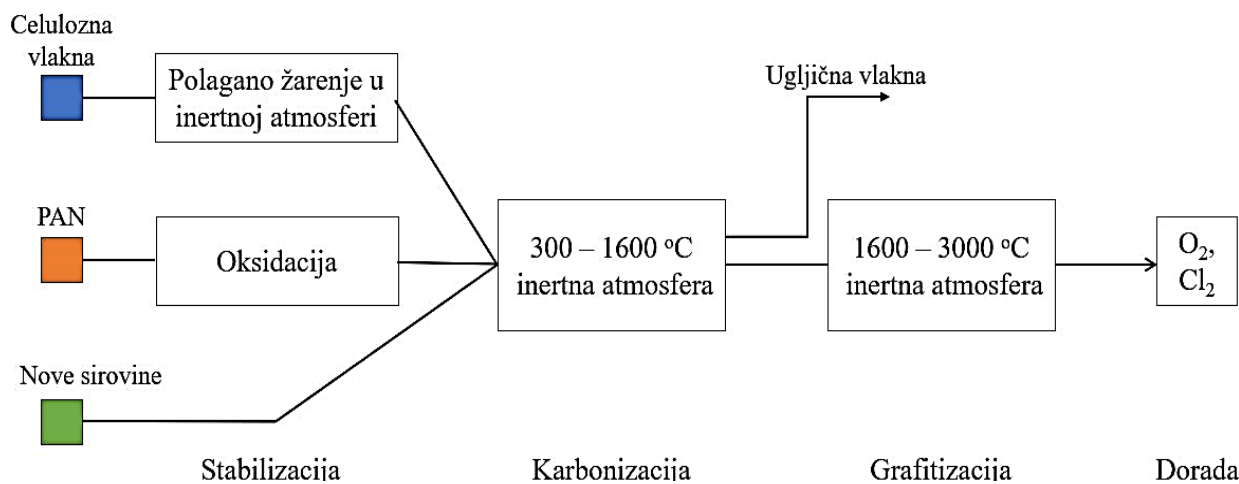
## 3. Ugljikova vlakna

Ugljikova vlakna imaju vrlo važnu ulogu u današnjoj industriji. Koriste se za proizvodnju čvrstih i laganih, a u isto vrijeme žilavih i toplinski otpornih materijala. Izgrađena su od međusobno povezanih ugljikovih atoma. Prema udjelu ugljika te prema stupnju uređenosti molekulske strukture, dijele se na izotropna i anizotropna. Danas se ta razlika u nazivima izbjegava te se sva vlakna visokih vrijednosti mehaničkih svojstava koja imaju modul elastičnosti veći od 350 GN/m<sup>2</sup> zovu ugljikova vlakna [4].

Organske tvari koje se koriste kao sirovina u proizvodnji ugljikovih vlakana moraju imati sposobnost tvorenja vlakana, tj. sposobnost ispredanja u tanke niti što je primarno svojstvo organskih linearnih polimernih tvari [4]. Osim toga, sirovine moraju biti postojane na visokim temperaturama toplinske obrade te se ne smiju razgrađivati.

Ugljikova vlakna mogu se proizvoditi iz nekoliko polaznih materijala, a najčešći među njima su poliakrilonitril (PAN), celulozna vlakna te mezofazne smole. Postoje metode kojima se ugljikova vlakna mogu proizvesti i iz pirolitičkih ostataka, izotropnih smola, fenolformaldehidnih smola, polivinil alkohola te iz naftnog koksa.

Glavna sirovina za dobivanje je poliakrilonitril (PAN) zbog optimalne kombinacije cijene i kvalitete. Proces proizvodnje odvija se u nekoliko faza prikazanih na slici 1.



**Slika 1.** Shematski prikaz faza proizvodnje ugljikovih vlakana [4]

Prvi korak je tzv. pređenje vlakana tijekom kojeg se sirovina za proizvodnju provlači kroz niz mlaznica kako bi se formirao vlaknasti materijal. Postoje četiri načina izvođenja pređenja; mokro pređenje, mokro pređenje uz dovod zraka, suho pređenje i pređenje otopljenog akrilnog polimera. Ovisno o metodi, mogu se dobiti različiti oblici presjeka; vlakna kružnog oblika, trakastog oblika te vlakna oblika pseće kosti.

Drugi korak je zagrijavanje vlaknaste sirovine, odnosno stabilizacija. Celulozna vlakna stabiliziraju se žarenjem na 1000 °C u inertnoj atmosferi, dok se PAN vlakna stabiliziraju na temperaturama između 180...300 °C. Ovaj korak provodi se kako bi došlo do kemijskog umrežavanja polimernih molekula što osigurava stabilnost pri daljnjem zagrijavanju.

Sljedeća faza u proizvodnji je karbonizacija u inertnoj atmosferi na temperaturama višim od 1000 °C. Provodi se kako bi se izdvojili isparljivi nusprodukti te kako bi se povisio sadržaj ugljika u vlaknu. Otprilike polovica ukupne početne mase ovim procesom ispari u obliku vode, ugljikovog dioksida, amonijaka i sl. Nakon karbonizacije dobije se ugljikovo vlakno visoke čvrstoće.

Daljnja obrada na temperaturama višim od 1800 °C dovodi do grafitizacije vlakana. Ova faza dovodi do nastanka vlakana visokog modula elastičnosti i visoke vodljivosti. Grafitizacija traje svega nekoliko minuta, dok se karbonizacija provodi oko jedan sat.

Ovisno o namjeni, vlakna se mogu podvrgnuti različitim postupcima dorade kako bi se postigla željena svojstva. To može uključivati nanošenje zaštitnih premaza, toplinsku obradu, oksidaciju u atmosferi kisika i klora, impregnaciju otopinama itd.

Ugljikova vlakna su sastavljena od međusobno povezanih tankih vlakana ugljika koja se sastoje od mnoštva slojeva kristala orijentiranih u smjeru vlakna. Veličina kristalita iznosi oko 20 nm, a udaljenost između slojeva je oko 0,337 nm. Stupanj središtenosti ugljikovih atoma u ugljikovim vlaknima, udio, oblik, veličina i orijentacija kristalita utječu na vrijednosti

mehaničkih svojstava. Stupanj središtenosti povisuje se toplinskom obradom, a karbonizacija i grafitizacija daju visok stupanj aksijalne orijentacije te povisuju udio ugljika.

Ugljikova vlakna u usporedbi sa svim ostalim vlaknastim materijalima za ojačanje imaju najvišu specifičnu krutost i najvišu specifičnu čvrstoću. Osim toga, ugljikova vlakna imaju visoku žilavost i dinamičku izdržljivost, visoku otpornost na korozijsko djelovanje i oksidaciju na visokim temperaturama te visoku električnu i toplinsku vodljivost. Ugljikova vlakna nisu otrovna te su biološki kompatibilna što ih čini prikladnim materijalom za izradu medicinske opreme i pomagala. Jedan od nedostataka im je vrlo niska istezljivost.

U proizvodnji kompozita ojačanih ugljikovim vlaknima kao materijal matrice najčešće se koriste epoksidne smole, a ponekad i poliesterske ili vinilesterske smole.

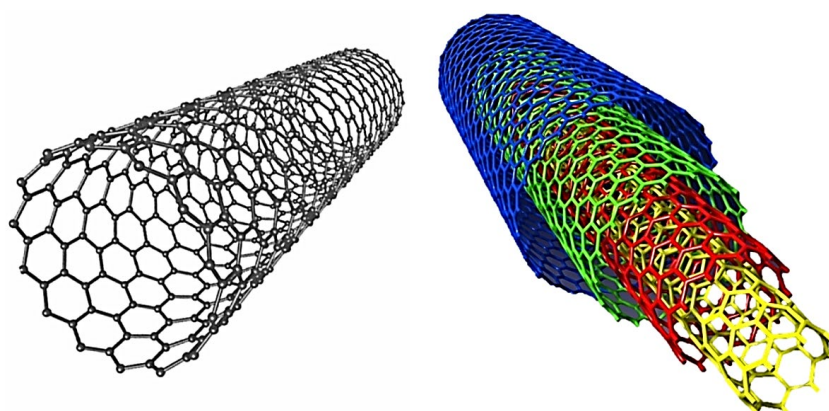
Najčešći proizvodni postupci su: lijevanje, namotavanje, pultrudiranje, proizvodnja preprega te ručno polaganje. Manje zastupljeni postupci uključuju prešanje traka, deformiranje i difuzijsko povezivanje, vakuumiranje te oblikovanje komprimiranjem [1].

#### 4. Ugljikove nanocjevčice

Ugljikove nanocjevčice se sastoje od ugljikovih atoma međusobno povezanih u ponavljajuću heksagonalnu rešetku kako bi stvorile šuplji cilindrični oblik. Imaju nanometarski promjer, a duljine su od mikrometra do najviše centimetra.

Iako su u osnovi fulereni, njihovo otkriće nije poteklo iz otkrića molekule fulerena C<sub>60</sub>. Godine 1991. prvu pravu ugljikovu nanocjevčicu otkrio je Sumio lijima kada je eksperimentirajući s električnom lukom, pronašao šuplja vlakna na grafitnoj anodi.

Postoji više oblika ugljikovih nanocjevčica. Osim ravnog, postoji i savijeni, razgranati te namotani, odnosno oblik serpentina. Ugljikove nanocjevčice prema strukturi dijele se u dvije glavne skupine, a to su ugljikove nanocjevčice s jednostrukom stijenkom (engl. Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNT) i ugljikove nanocjevčice s višestrukom stijenkom (engl. Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNT). Njihova struktura prikazana je na slici 2.



**Slika 2.** Ugljikove nanocjevčice s jednostrukom (lijevo) i višestrukom stijenkom (desno) [5]

Ugljikovu nanocjevčicu s jednostrukom stijenkom može se opisati kao dugačku cijev izrađenu od jednog sloja grafena omotanog u cilindar. Većina nanocjevčica s jednostrukom

stijenkom ima promjer između 0,4 nm i 3 nm, ovisno o temperaturi sintetiziranja. Duljina može biti čak i do nekoliko milijuna puta veća od promjera. Karakterizira ih jako velika površina od 1300 m<sup>2</sup>/g, što ih čini veoma pogodnim za specijalne primjene u medicini i elektrotehnici.

Nanocjevčice s višestrukum stijenkom sastoje se od dvaju ili više koaksijalnih jednostjenčanih nanocjevčica. Izrađuju se na način da se cijevi većeg promjera stavlja na cijev manjeg promjera ili višestrukim namatanjem jednog grafenskog sloja. Zbog većeg broja slojeva, ugljikove nanocjevčice s višestrukum stijenkom imaju znatno veću čvrstoću pa su iz tog razloga zastupljenije u proizvodnji kompozitnih materijala. Vanjski promjer kreće se u rasponu od 2 nm do 100 nm, dok je unutarnji uobičajeno od 1 nm do maksimalno 3 nm. Duljina ugljikovih nanocjevčica s višestrukum stijenkom može biti čak i do nekoliko centimetara.

Strukture ugljikovih nanocjevčica s višestrukum stijenkom, obzirom na raspored grafenskih slojeva, mogu se podijeliti u dvije skupine. U slučaju da su slojevi grafena raspoređeni jedan unutar drugoga, dobiva se struktura slična modelu ruske lutke, dok se druga vrsta strukture, slična obliku pergamenta, postiže namatanjem grafena u više slojeva.

Od njihova otkrića pa sve do danas intenzivno se istražuje o optimalnim postupcima proizvodnje ugljikovih nanocjevčica. Četiri osnovna postupka proizvodnje su: proizvodnja pomoću električnog luka, laserska ablacija, kemijsko taloženje iz parne faze te katalitička razgradnja. Svaki od tih postupaka ima svoje prednosti i nedostatke, a odabir ovisi o postavljenim zahtjevima.

Ugljikove nanocjevčice karakterizira izrazito visoka vlačna čvrstoća (100...200 GPa) te najviši modul elastičnosti od svih drugih materijala koji doseže vrijednost čak do 1000 GPa, što je pet puta više nego kod čelika. U tablici 1. navedene su vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti nekih materijala.

**Tablica 1.** Vrijednosti  $R_m$  i  $E$  različitih materijala [1]

Materijal	Vlačna čvrstoća, GPa	Youngov modul elastičnosti, GPa
Ugljikove nanocjevčice	100 - 200	1000
Ugljikova vlakna	1,3	210
Visokočvrsti čelik	3,5	230
Kevlar	3,6	60
Staklena vlakna	3,4	22

Mogu se lako savijati, a po prestanku djelovanja sile vraćaju se u prvobitni oblik. Imaju vrlo visoku toplinsku i električnu provodljivost. Ovisno o rasporedu atoma ugljika i kutu kiralnosti, ugljikove nanocjevčice mogu se ponašati kao vodiči, poluvodiči ili izolatori. Također, imaju i dobra svojstva apsorpcije zračenja i fotoluminiscencije.

Zbog svojih izuzetno dobrih i specifičnih svojstava, ugljikove nanocjevčice pronalaze primjenu u raznim područjima. Trenutno se najviše primjenjuju za poboljšanje svojstava

različitih konstrukcijskih materijala. Dodavanje ugljikovih nanocjevčica u polimerne matrice znatno povećava mehanička svojstva, toplinsku stabilnost i negorivost te čak omogućuje postizanje novih svojstava, kao što su električna i toplinska vodljivost. Specifična električna svojstva ugljikovih nanocjevčica omogućuju njihovu primjenu u području nanoelektronike. Imaju potencijalnu primjenu i kao elementi naprednih senzora te različitih osjetila. Također, istražuje se i mogućnost korištenja ugljikovih nanocjevčica kao jedinica za pohranu energije. Znanstvenici su nedavno otkrili i odlična filtracijska svojstva ugljikovih nanocjevčica. Analizom istraživanja dokazano je da su učinkovitije od klasičnih filtera kada je u pitanju uklanjanje nečistoća iz kontaminirane vode.

## **5. Primjena suvremenih ugljičnih materijala u sustavima za iskorištavanje obnovljivih izvora energije**

Obnovljivi izvori energije su oni koji se prirodno obnavljaju i ne iscrpljuju se korištenjem. Glavni obnovljivi izvori energije su: sunčeva energija, vjetroenergija, hidroenergija, geotermalna energija, biomasa te energija plime i oseke. Korištenjem ovih izvora energije moguće je smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima i emisije stakleničkih plinova.

### **5.1. Sustavi za korištenje biomase**

Aktivni ugljen i ugljikove nanocjevčice koriste se kao katalizatori u pretvorbi biomase u biogoriva. Ovi materijali osiguravaju veliku površinu i aktivna mjesta, što poboljšava učinkovitost katalitičkih procesa.

Ugljični materijali se koriste u razvoju naprednih baterija i superkondenzatora za skladištenje energije proizvedene iz biomase. Ovi materijali nude visoku vodljivost, stabilnost, veliku površinu i podesive strukture pora, što ih čini idealnima za pohranu energije [6].

Aktivni ugljen se koristi kao adsorbent za uklanjanje nečistoća i zagađivača iz plinova i tekućina proizvedenih tijekom obrade biomase. Njegova velika površina i poroznost omogućuju učinkovito adsorbiranje štetnih tvari [7].

U nekim sustavima za iskorištavanje biomase kompoziti od ugljičnih vlakana koriste se za izradu konstrukcijskih komponenti. Ovi kompoziti imaju visoku specifičnu čvrstoću i izdržljivost, koji su ključni za dugotrajnost i učinkovitost ovih sustava.

Grafen i drugi ugljični nanomaterijali koriste se u razvoju senzora i nadzornih uređaja za praćenje procesa obrade biomase. Ovi senzori mogu otkriti promjene temperature, tlaka i kemijskog sastava, osiguravajući optimalan rad i sigurnost.

### **5.2. Sustavi za korištenje hidroenergije**

Primjena suvremenih ugljičnih materijala doprinosi poboljšanju učinkovitosti, održivosti i ekološke kompatibilnosti hidroenergetskih sustava [8].

Ugljični kompoziti se koriste za izradu turbinskih lopatica i drugih konstrukcijskih komponenti. Ovi materijali imaju visoku specifičnu čvrstoću, otpornost na koroziju i trajnost, što je ključno za dugotrajnost, veću učinkovitost te smanjenje troškova održavanja.





U pumpno-akumulacijskim hidroenergetskim sustavima, suvremeni ugljični materijali koriste se u razvoju baterija i superkondenzatora visokih performansi. Njihova visoka vodljivost i kapacitet za skladištenje energije čine ih idealnima za ove primjene. Ovi uređaji pomažu u balansiranju mreže pohranjujući višak energije tijekom razdoblja niske potražnje i oslobađajući je tijekom vršne potražnje.

Aktivni ugljen se koristi u procesima obrade vode u hidroelektranama za uklanjanje nečistoća i poboljšanje kvalitete vode, što je bitno za održavanje zdravlja vodenih ekosustava i poboljšanje učinkovitosti turbina.

Grafen i ugljikove nanocjevčice koriste se u razvoju naprednih senzora i nadzornih uređaja za praćenje stanja hidroenergetskih sustava. Ovi senzori mogu otkriti promjene u tlaku, temperaturi i protoku vode, što doprinosi optimizaciji rada i prevenciji kvarova.

Korištenjem suvremenih ugljičnih materijala može se smanjiti utjecaj na okoliš hidroenergetskih sustava. Na primjer, ugljični kompoziti mogu se dizajnirati tako da minimiziraju ozljede riba i poboljšaju kvalitetu vode boljim tehnikama prozračivanja.

Ugljični nanomaterijali se koriste za premazivanje metalnih dijelova hidroenergetskih sustava radi sprječavanja korozije čime se produljuje trajnost opreme i smanjuju troškovi održavanja [4].

### 5.3. Solarni fotonaponski sustavi

Ugljikove nanocjevčice i grafen koriste se kao vodljivi slojevi u solarnim ćelijama. Njihova izvrsna električna vodljivost doprinosi učinkovitijem prijenosu elektrona, što povećava ukupnu učinkovitost solarnih ćelija [9].

Grafen se koristi za izradu prozirnih elektroda u solarnim ćelijama. Njegova visoka vodljivost i prozirnost omogućuju bolju apsorpciju svjetlosti i povećavaju učinkovitost pretvorbe sunčeve energije u električnu [10].

Fulereni i njihovi derivati koriste se u aktivnim slojevima organskih fotonaponskih (OPV) ćelija. Ovi materijali pomažu u učinkovitom odvajanju i transportu nositelja naboja, što dovodi do poboljšanja učinkovitosti pretvorbe sunčeve u električnu energiju [10].

Ugljični kompoziti koriste se za kapsuliranje solarnih ćelija kako bi se zaštitile od čimbenika iz okoline, kao što su vlaga i UV zračenje. To povećava izdržljivost i produljuje vijek trajanja solarnih panela.

Suvremeni ugljični materijali također se koriste u razvoju naprednih baterija i superkondenzatora za skladištenje energije. Njihova visoka vodljivost i kapacitet za pohranu energije čine ih idealnima za ove primjene. Superkondenzatori na bazi ugljika mogu se kombinirati sa solarnim ćelijama za pohranjivanje viška energije proizvedene tijekom vršnih sati sunčeve svjetlosti [9].

Ugljikove nanocjevčice mogu zamijeniti skuplje materijale, poput srebra u solarnim ćelijama, što smanjuje troškove proizvodnje i čini solarne panele pristupačnijima.

Kompoziti ojačani ugljikovim vlaknima koriste se za izradu laganih i izdržljivih okvira za solarne panele. To povećava otpornost na vremenske uvjete i produljuje vijek trajanja.

#### 5.4. Solarni toplinski sustavi

Ugljikove nanocjevčice i grafen koriste se za izradu apsorpcijskih premaza na solarnim kolektorima. Ovi materijali imaju visoku toplinsku vodljivost i sposobnost apsorpcije sunčeve energije, što povećava učinkovitost pretvorbe sunčeve energije u toplinsku [11].

Ugljični materijali se koriste u razvoju naprednih sustava za skladištenje toplinske energije. Integrirani su u materijale s promjenom faze (PCM) radi poboljšanja njihove toplinske vodljivosti. Ovo poboljšanje omogućuje učinkovitije skladištenje i oslobađanje toplinske energije, što je ključno za održavanje dosljedne opskrbe energijom. Fazno promjenjivi materijali (PCM) mogu pohraniti veliku količinu toplinske energije i osloboditi je kada je to potrebno, čime se povećava učinkovitost korištenja solarne energije [12].

Ugljikove nanočestice dodaju se tekućinama za prijenos topline kako bi se poboljšala njihova toplinska vodljivost i toplinski kapacitet. To rezultira učinkovitijim prijenosom topline unutar solarnog toplinskog sustava, čime se poboljšava ukupna učinkovitost.

Polimeri ojačani ugljikovim vlaknima (eng. Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP) koriste se za izradu različitih strukturnih komponenti solarnih toplinskih sustava. Ovi materijali imaju visoku specifičnu čvrstoću i otpornost na koroziju. Njihovom primjenom produljuje se vijek trajanja sustava i smanjuju troškovi održavanja [11].

Ugljikova vlakna koriste se za izradu izolacijskih materijala koji smanjuju gubitke topline u solarnim toplinskim sustavima. To omogućuje bolje zadržavanje topline i povećava ukupnu učinkovitost sustava.

#### 5.5. Sustavi za korištenje vjetroenergije

Kompoziti ojačani ugljikovim vlaknima imaju široku primjenu za izradu lopatica vjetroturbina. Ovi materijali imaju visoku specifičnu čvrstoću, što omogućuje konstrukciju duljih i učinkovitijih lopatica bez značajnog povećanja njihove mase. Takve lopatice mogu izdržati velike sile pri udarima vjetra što rezultira boljim hvatanjem energije vjetra i ukupnom učinkovitošću.

Ugljični kompoziti koriste se i za izradu drugih konstrukcijskih dijelova vjetroturbina, poput nosača i kućišta. Ovi materijali imaju visoku krutost i otpornost na umor, što je ključno za dugoročnu pouzdanost vjetroturbina. Njihova otpornost na koroziju i dugotrajnost čine ih idealnima za primjenu u teškim vremenskim uvjetima [13].

U električnim generatorima ugljični materijali pomažu u poboljšanju učinkovitosti pretvorbe mehaničke u električnu energiju, pridonoseći ukupnoj učinkovitosti sustava.

Ugljični kompoziti koriste se u mjenjačima i ležajevima radi smanjenja trenja i trošenja. To povećava trajnost i pouzdanost ovih kritičnih komponenti, smanjujući troškove održavanja i vrijeme zastoja [13].

Ugljični materijali se također koriste u sustavima za zaštitu od munje za vjetroturbine. Njihova izvrsna električna vodljivost pomaže u sigurnom raspršivanju udara groma, štiteći tako turbinu od oštećenja.

Grafen se koristi u razvoju naprednih električnih sustava unutar vjetroturbina. Njegova visoka vodljivost i fleksibilnost omogućuju poboljšanje učinkovitosti prijenosa energije.

Ugljični materijali koriste se i u razvoju senzora za praćenje stanja vjetroturbina. Ovi senzori mogu otkriti promjene u strukturi i performansama turbine, omogućujući pravovremeno održavanje i smanjenje rizika od kvarova [14].

#### 5.6. Sustavi za korištenje geotermalne energije

Grafen se koristi za poboljšanje učinkovitosti izmjenjivača topline u geotermalnim sustavima. Njegova izvanredna toplinska vodljivost pomaže u učinkovitom prijenosu topline iz geotermalnih fluida u radni fluid, čime se povećava ukupna učinkovitost sustava [15].

Ugljični kompoziti koriste se za izradu opreme za bušenje kako bi se smanjilo njeno trošenje i povećala trajnost. Ova oprema treba izdržati visoke temperature i abrazijske uvjete.

Polimeri ojačani ugljikovim vlaknima koriste se u izradi cjevovoda i kućišta. Ovi materijali imaju visoku specifičnu čvrstoću, otpornost na koroziju i visoke temperature, što je bitno za dugotrajan rad geotermalnih postrojenja. Mogu izdržati ekstremne uvjete koji se često javljaju u geotermalnim sustavima.

Ugljični materijali također se koriste za poboljšanje izolacijskih svojstava cjevovoda i spremnika. Njihova visoka toplinska otpornost pomaže u održavanju temperature geotermalnih tekućina tijekom transporta iz rezervoara na površinu čime se smanjuju gubici energije.

Ugljični materijali mogu izdržati teške uvjete rada i koriste se u sensorima i nadzornim sustavima kako bi se osigurao učinkovit rad geotermalnih postrojenja. Ovi senzori mogu otkriti promjene u temperaturi, tlaku i strukturnom integritetu, što doprinosi pravovremenom održavanju i smanjenju rizika od kvarova.

#### 5.7. Sustavi za korištenje energije mora

Ugljični kompoziti koriste se za izradu konstrukcijskih dijelova uređaja za iskorištavanje energije valova i plime. Njihova visoka čvrstoća i otpornost na koroziju čine ih idealnima za primjenu u morskom okruženju [16].

Ugljikova vlakna koriste se u proizvodnji lopatica i rotora u uređajima za iskorištavanje energije morskih struja. Ovi materijali omogućuju izradu laganih, ali izdržljivih komponenti koje mogu izdržati velike sile morskih struja.

Ugljični materijali koriste se u razvoju naprednih senzora za praćenje stanja sustava za korištenje energije mora.

Grafen se koristi za povećanje učinkovitosti električnih sustava unutar energetskih uređaja. Njegova visoka vodljivost i fleksibilnost poboljšavaju prijenos energije i smanjuju gubitke.

## 6. Zaključak

Znanstvenici i inženjeri diljem svijeta intenzivno istražuju ugljikove strukture koje se zasebno ili kao ojačala u ugljičnim kompozitima koriste za različite namjene u gotovo svim granama industrije. Unapređuju se postupci proizvodnje ugljikovih struktura, kao i postupci proizvodnje ugljičnih kompozita njima ojačanih. Zbog svojih izvanrednih svojstava i prednosti, suvremeni ugljični materijali sve se više koriste u sustavima za iskorištavanje

obnovljivih izvora energije. Njihova primjena značajno doprinosi poboljšanju učinkovitosti, pouzdanosti, dugotrajnosti, ekološke kompatibilnosti i održivosti tih sustava čineći ih ključnim elementom u razvoju iskorištavanja obnovljivih izvora energije.

## 7. Literatura

- [1] Filetin, Tomislav; Kovačiček, Franjo; Indof, Janez. Svojstva i primjena materijala, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2007.
- [2] Filetin, Tomislav. Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala, Zagreb, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2000.
- [3] Filetin, Tomislav. Materijali i tehnološki razvoj, Zagreb, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, 2002.
- [4] Legin-Kolar, Mira; Rađenović, Ankica. Ugljični materijali. Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak. 2002. (ISBN 9539782155)
- [5] Nanotubes and Carbon Fibers  
<https://worldofnanoscience.weebly.com/nanotube--carbon-fiber-overview.html>
- [6] Mengdan, Yan; Yuchen, Qin; Lixia, Wang; Meirong, Song; Dandan, Han; Qiu, Jin; Shiju, Zhao; Miaomiao, Zhao; Zhou, Li; Xinyang, Wang; Lei, Meng; Xiaopeng, Wang. Recent Advances in Biomass-Derived Carbon Materials for Sodium-Ion Energy Storage Devices  
<https://www.mdpi.com/2079-4991/12/6/930>
- [7] Šegon, Velimir; Šimek, Tijana; Oradini, Arturo; Marchetti, Marco; Paladinić, Elvis. Priručnik za učinkovito korištenje biomase, Hrvatski šumarski institut, 2014.  
<https://www.sumins.hr/wp-content/uploads/2017/08/Prirucnik.Biomasa-hrv.pdf>
- [8] Bashir, Aneeqa; Mehvish, Azka; Khalil, Maria. Advanced Carbon Materials for Sustainable and Emerging Applications  
<https://www.intechopen.com/chapters/78704>
- [9] Dada, Modupeola; Popoola, Patricia. Recent advances in solar photovoltaic materials and systems for energy storage applications: a review  
<https://bjbas.springeropen.com/articles/10.1186/s43088-023-00405-5>
- [10] Kondolot Solak, Ebru; Irmak, Erdal. Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/ra/d3ra01454a>
- [11] Badenhorst, H. Carbon Materials for Solar Thermal Energy  
[https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/49523/Badenhorst\\_Carbon\\_2015.pdf?sequence=1](https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/49523/Badenhorst_Carbon_2015.pdf?sequence=1)
- [12] Lafta Rashid, Farhan; A. Al-Obaidi, Mudhar; Dulaimi, Anmar; Y. Bahlol, Haitham; Hasan, Ala. Recent Advances, Development, and Impact of Using Phase Change Materials as Thermal Energy Storage in Different Solar Energy Systems: A Review  
<https://www.mdpi.com/2411-9660/7/3/66>
- [13] Teng, Hanwei; Li, Shujian; Cao, Zheng; Li, Shuang; Li, Changping; Jo Ko, Tae. Carbon Fiber Composites for Large-Scale Wind Turbine Blades: Applicability Study and Comprehensive Evaluation in China  
<https://www.mdpi.com/2077-1312/11/3/624>
- [14] Hu, Chengyi; Zheng, Nanfeng. ACS Central Science Virtual Issue on Advanced Materials and Processes for Building Low-Carbon Energy Systems  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.4c00925>
- [15] Rdest, Monika; Janas, Dawid. Carbon Nanotube Films for Energy Applications  
<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1890>
- [16] Rubino, Felice; Nisticò, Antonio, Tucci, Fausto; Carlone; Pierpaolo. Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review  
<https://www.mdpi.com/2077-1312/8/1/26>

## Umjetna inteligencija u konstruiranju *Artificial intelligence in construction*

P. Nakić<sup>1,\*</sup>, F. Šlehta<sup>1</sup>, M. Čeme<sup>2</sup>, I. Džambo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>2</sup>IN2 d.o.o., Zagreb, Hrvatska

<sup>3</sup>Janaf d.d., Zagreb, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [pnakic@unisb.hr](mailto:pnakic@unisb.hr)

### Sažetak

Živimo u dobu kada pojam umjetne inteligencije dolazi do svakoga čovjeka. U budućnosti će se umjetna inteligencija ugnijezditi u skoro sve pore našega života. U proteklih par godina umjetna inteligencija raste, te se razvija u primjeni velikom brzinom doslovno preko noći se razvija u pojedinim segmentima društva. Očekivanja su da će uskoro pomoći ljudima u svim granama, a ponajviše u medicini.

Također, našim inženjerima strojarstva i građevine koji se bave konstrukcijama, te samim građenjem mogla bi uvelike olakšati njihov rad. Ima već alata koji postoje i koje pomažu pri samim konstrukcijama, tako smo mi u ovom radu proučili dva alata koja olakšavaju inženjerima na terenu njihov posao.

**Ključne riječi:** umjetna inteligencija, konstruiranje, Alice construction, cove tool.

### Abstract

We live in an age when the concept of artificial intelligence reaches every human being. In the future, artificial intelligence will be embedded in almost every part of our lives. In the past few years, artificial intelligence has been growing, and it is developing in application at a high speed, literally overnight, in certain segments of society. It is expected that it will soon help people in all branches, and above all in medicine.

Also, it could make their work much easier for our mechanical and construction engineers who deal with structures and construction itself. There are already existing tools that help with the constructions themselves, so in this paper we studied two tools that make their work easier for engineers in the field.

**Key words:** artificial intelligence, construction, Alice construction, cove tool.

### 1. Uvod

U građevinarstvu i konstruiranju umjetna inteligencija se koristi se za automatizaciju i optimizaciju različitih procesa, od analize podataka do planiranja i upravljanja projektima. Može se koristiti u raznim područjima kao što su arhitektura, građevinarstvo, upravljanje



gradilištima i održavanje zgrada. Korištenje umjetne inteligencije u građevinskoj industriji donosi mnoge prednosti. Prvo, umjetna inteligencija omogućuje poboljšanje učinkovitosti građevinskih procesa ubrzanje m procesa planiranja i izgradnje te minimiziranjem ljudskih pogrešaka.[1] To rezultira uštedom vremena i troškova za građevinske tvrtke i omogućuje bržu i učinkovitiju isporuku projekta.

## 2. Primjena umjetne inteligencije u konstruiranju

Umjetna inteligencija može doprinijeti smanjenju rizika i sigurnosti na gradilištu. Sustavi umjetne inteligencije mogu analizirati podatke senzora - predvidjeti potencijalne probleme ili opasne situacije, omogućujući menadžerima da poduzmu pravovremene preventivne mjere kako bi osigurali sigurnost radnika na gradilištu.[23] Planiranje projekata jedna od glavnih primjena umjetne inteligencije. Sustav može analizirati podatke o projektu i stvoriti optimizirane i realistične projektne planove uzimajući u obzir parametre kao što su vrijeme, troškovi i raspoloživi resursi. Praćenje gradilišta je još jedno područje u kojem je umjetna inteligencija primjenjiva. Korištenjem senzora i algoritama strojnog učenja mogu se u stvarnom vremenu prikupljati i analizirati podaci statusu gradilišta. To voditeljima projekta omogućuje praćenje napretka prepoznavanje odstupanja i donošenje pravovremenih odluka. Umjetnom inteligencijom može se značajno poboljšati i upravljanje materijalom. Mogu analizirati podatke o nabavi, upravljati zalihama i predviđati potrošnju kako bi optimizirali nabavu.

### 2.1. Alice construction

Alice je prva na svijetu AI platforma za simulaciju izgradnje i optimizaciju. S ovim programom veliki izvođači radova i vlasnici mogu učinkovitije graditi i planirati ponude. Zvuči zaintrigirano, evo kako to funkcionira. Postoji određeni broj koraka za korištenje Alice. Prvi je potrebno odrediti plan rada. Ovdje je to brz i jednostavno samo prenošenjem 3D modela. Zatim je potrebno definiranje raspoložive radne snage i dostupnost opreme, stope proizvodnje, lokacije dizalica i kalendara i prema potrebi dodavanje dodatnih ograničenja. Sljedeće je unošenje metode konstrukcije koje su predstavljene u Alice kao recept. Recepti sadrže potrebe zadatka, resurse i logiku za dovršetak elementa definiranog projekta. Pruža se mogućnost ponovnog korištenja recepta ili njihovog poboljšanja dok učite između projekata. Alice je parametrična, što znači da postoji mogućnost promijene bilo kojih parametara projekta u hodu i odmah preraspodjela projekta na temelju plana. Alice će simulirati projekt milijune puta automatski stvarajući rješenja koja zadovoljavaju skup pravila i daju najbolji redoslijed rada. Također može jednostavno kvantificirati trošak i vremenski učinak različitih odluka. Na primjer, što ako bih se dodala još jedna dizalica ili bi ekipa za beton trebala raditi prekovremeno za svako rješenje?

Alice generira 3D raspored s punim resursima u nekoliko sekundi. Nema više izrade rasporeda po zadacima u Excelu, Alice radi težak posao umjesto konstruktora nakon što odabira rasporeda. U procesu vođenja projekta Alice se može upotrijebiti za vizualizaciju napretka. Ako naiđete na kašnjenja, oslobodite snagu umjetne inteligencije da ponovno rasporedi svoje resurse i vrati sve na pravi put. Ovi inteligentni alati analizirali su podatke o



prošlim projektima kako bi predvidjeli vremenske rokove projekta, raspodjelu resursa i potencijalne rizike točnije nego što bi itko ikada mogao, čineći živote građevinskih inženjera mnogo lakšim. Umjetna inteligencija pomaže građevinskim menadžerima u donošenju odluka temeljenih na podacima.

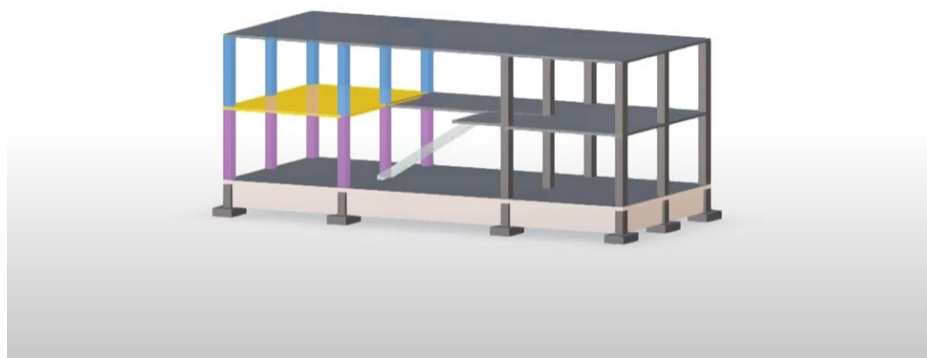
Oni mogu smanjiti trajanje svojih projekata za prosječno 17%, smanjiti troškove rada za 14% i troškove opreme za 12%. Uz Alice brže isporučite svoje projekte i poboljšajte svoje projekte.

Nekoliko ključnih koraka prilikom rada u ovom računalnom programu:

- Učitavanje modela.
- Assign support
- Stvaranje recepata
- Generiranje rasporeda
- Analiza rasporeda
- Ažuriranje rasporeda

Predstavit ću to na jednom jednostavnom primjeru. Prvi korak prilikom korištenja ovog programa bit će unošenje 3D modela željene konstrukcije. Potrebno je unijeti naziv projekta i odabrati datum početka projekta. Alice će za početak koristiti analizator podudaranja kako bi automatski dodijelila odnose pojedinih elemenata projekta. Može tretirati više planova za bilo koji projekt. To omogućuje da istraživanje različitih strategija gradnje. Time omogućuje da se usredotočimo na postavljanje točnog plana projekta i prepustimo raspoređivanje zadataka Alice.

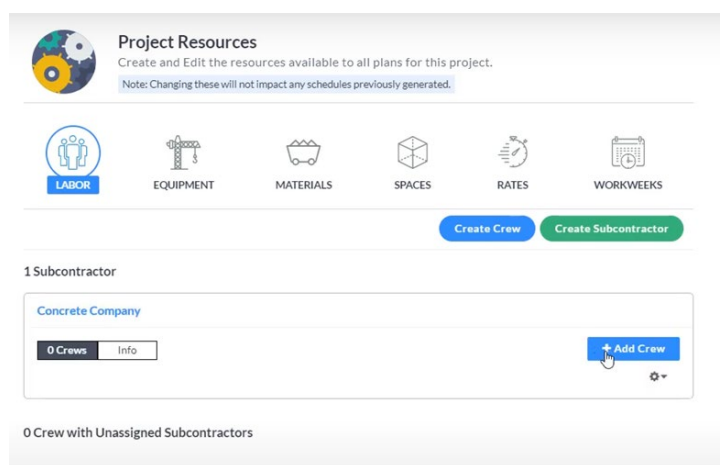
Koristimo projektne resurse i recepte za povezivanje grupa kako bismo uspostavili svoj plan, Alice će ih zatim koristiti kao ograničenja za generiranje optimiziranog projekta koji je zakazan. Započnimo s pregledom povezanosti (support) koje je Alice automatski dodijelila tijekom procesa učitavanja ukupne povezanosti za elemente konstrukcije. Povezanost predstavlja ovisnost pojedinog elementa konstrukcije o drugim elementima, tj prikazuje redoslijed kojim se moraju ili mogu izvršiti. Jednostavno odabirom određenog element, on će postati istaknut žutom bojom s prethodnim operacijama označenim ljubičastom bojom, a zatim sljedećim operacijama označenim plavom bojom kao što je prikazano na Slici 1



**Slika 1** Prikaz redoslijeda izvođenja pojedinih elemenata na jednostavnom primjeru[2]

Povezanost ukazuje Alice kako će recepti za te elemente međusobno djelovati. Jedan način razmišljanja o tome jest da će to pomoći u određivanju slijeda za projekt za ovu odabranu ploču. Recept je u ovih 6 ljubičastih stupaca, moramo ga započeti i eventualno dovršiti kako bi daljnja gradnja bila moguća, ovisno o tome kako smo postavili te recepte za daljnju izgradnju.

Prelazimo na izradu prvog recepta. Učitavanjem izbornik recepata projekta, možemo odabrati novi recept. Recept će sadržavati zadatke, resurse i logiku potrebnu za jednostavno davanje opsega posla. Za ovaj projekt izradit ćemo generički konkretni recept. Ovdje definiramo zadatke koji će biti potrebni za dovršetak zadatka. Imamo mogućnost priložiti radnike, radnu opremu, materijale, stope proizvodnje, prostore, trajanja pojedinog operacija, kao što se može vidjeti na Slici 2.

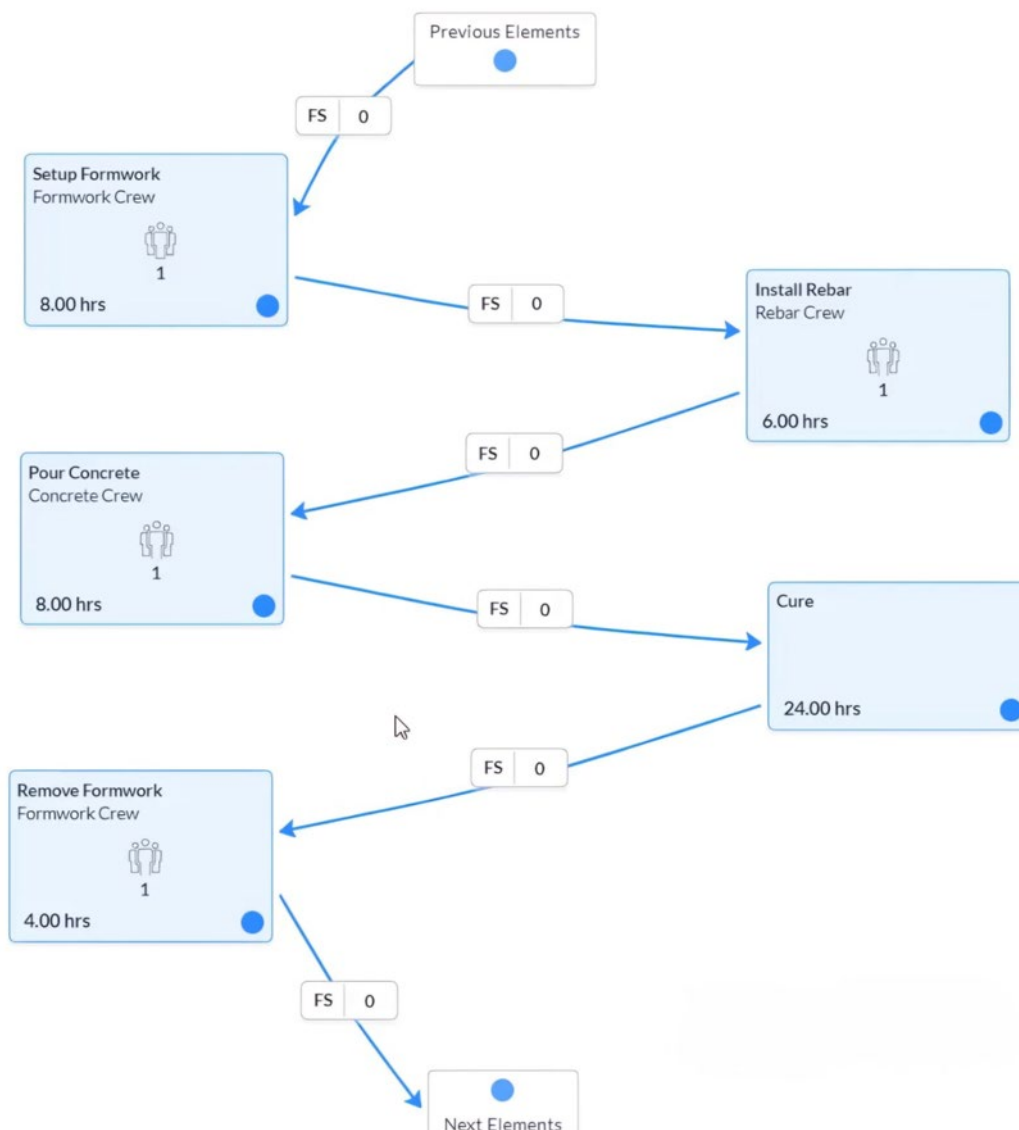


**Slika 2** Izbornik na unošenje podataka[2]

U ovom primjeru zbog jednostavnosti koristit će se samo trajanja i raspoloživost opreme. Dakle, unosimo 8 sati rada za dovršetak postavljanja oplata. Zatim se popunjava ostatak potrebnih operacija. Postavljanje armature, 6 sati te isto toliko za izlivanje betona. Za beton će se dodati stvrdnjavanje kao jedna stavka koja će trajati 24 sata. Nezaboravno uklanjanje oplata na koje će se utrošiti 4 sata. Potrebno je još unijeti raspoloživost opreme. Dakle, sada imamo sve zadatke kreirane, sljedeći korak je njihovo povezivanje s logikom.

Nakon toga idemo do projektnih resursa i „stvorimo“ radne snage. Kreirat ćemo podizvođača, konkretne tvrtke koje će izvoditi prethodno navedene radove. Odavde počinjemo, dodavanje tipova timova radnika kojima će biti dodijeljene određene radne operacije. Svakom timu radnika dodijeljen je zadani posao i kao i vremenska ograničenja, sate radnog tjedna (40-satni) te novčane troškove.

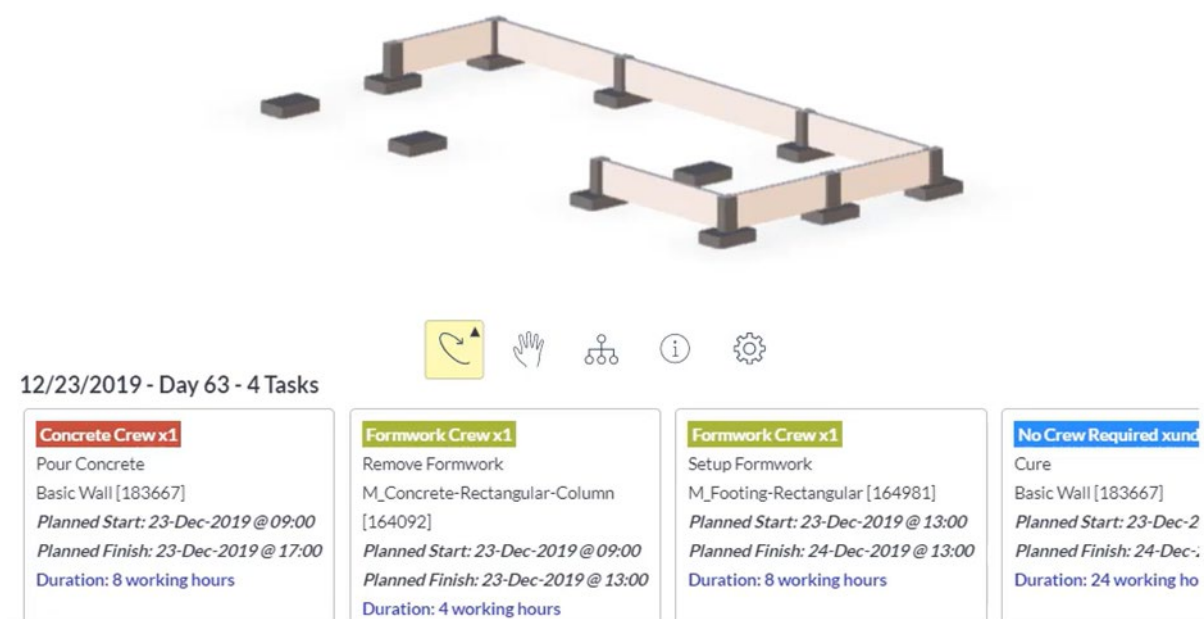




**Slika 3** Recept za izgradnju betonske konstrukcije[2]

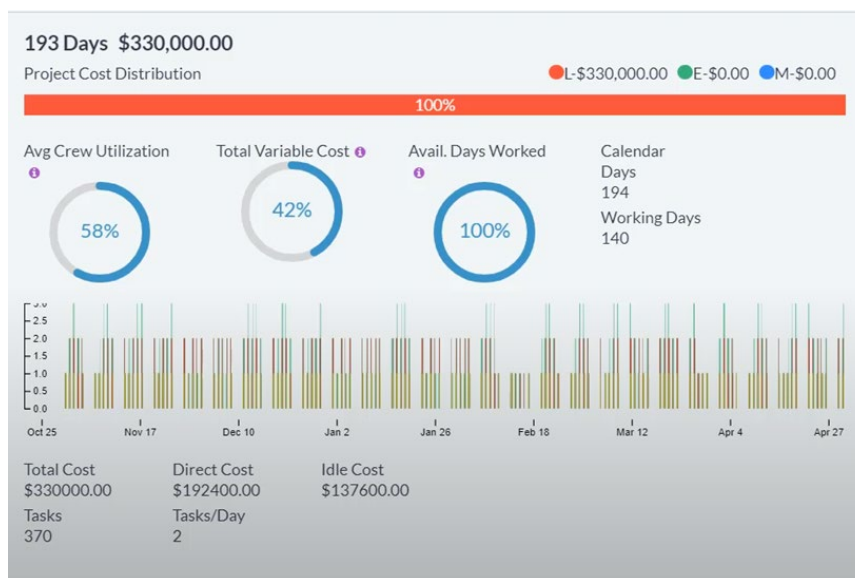
Za dodjeljivanje recepta jednostavno odaberete objekt i zatim na nadzornoj ploči elementa odaberete recept. To nam omogućuje da od naših dostupnih projektnih receptata odaberemo koji recept želimo dodijeliti. Projekt je spreman za generiranje rasporeda pojedinih operacija. Ovo će učitati stranicu „Explorer“. Ona je mjesto na kojem će se automatski početi izvoditi raspored osnovnih parametara. Pruža mogućnost kreiranja novih rasporeda, izvođenje osnovnih parametara temeljit će se na skupu resursa projekta koji smo uspostavili na stranici pogona kao rasporede i zatim će početi generirati.

Stranica omogućuje promjenu parametara resursa za generiranje novih rasporeda, ovo je sjajno jer možemo brzo usporediti više planiranih opcija kako se svaki raspored popunjava. Ovo će učitati novi prozor u vašem pregledniku. Analizirana stranica prikazat će Gantov grafikon sa svim vašim zakazanim zadacima, karticama radnih zadataka koje su označene bojama kako bi se pokazalo koja ekipa izvodi koju operaciju i gdje u modelu.



Slika 4 Slika simulacije izgradnje konstrukcije[2]

Također pruža mogućnost promijene prikaza kako biste pogledali analitiku svog projekta. Mogu se vidjeti i različite statistike, kao što je iskorištenost osoblja, troškovi.. Također postoji mogućnost izvoza ovih informacija.



Slika 5 Grafički prikaz raspoloživih resursa[2]



## 2.2 Cove tool

Cove.tool prednjači u dizajnu održivih zgrada, kombinirajući savjetovanje temeljeno na umjetnoj inteligenciji s naprednom analitikom za optimizaciju učinkovitosti i utjecaja na okoliš u cilju ubrzanja dekarbonizacije i izvrsnosti projekta.[3]. To je alat za projektiranje i analizu temeljenu na podacima koji pomaže arhitektima, inženjerima, izvođačima i arhitektima u optimizaciji projekata za troškove energije i ugljikovog dioksida. Ova software obuhvaća značajke za energetske modeliranje, dnevno osvjetljenje, optimizaciju troškova i još mnogo toga, a sve je umotano u web sučelje koje je jednostavno za korisnike. Projekt započinje definiranjem tipa građevine, unošenjem 3D modela, lokacije i energetske vrijednosti. 3D modeli se mogu uvesti iz popularnih alata ili izvorno nacrtati u web alatu za crtanje. S ova 4 jednostavna podatka, alat za analizu automatski stvara energetske modele i druge ulazne podatke potrebne za analizu. U nekim situacijama (ovisno o položaju u odnosu na okolinu), energetska vrijednost se automatski bira na temelju lokacije projekta. Također postoji način rada u koji se može unijeti područje zgrade bez potrebe za modelom. Uz definiranje projekta i geometrije, analiza je spremna za izvođenje. Alat za analizu dizajniran je za stvaranje vizualni prikaz podataka na modelu koji će biti postavljena na temelju lokacije. Zatim se izvodi 7 vrsta analize paralelno, pružajući uvid u prostornu dnevnu svjetlost građevine, autonomiju, godišnju izloženost Suncu, rezultate Sunčevog zračenja te energetska učinkovitost projekta zahvaljujući automatiziranim ulazima. Svaki projekt odmah prijavljuje svoj predloženi intenzitet potrošnje energije. Shvatite operativne troškove i emisiju ugljikovog dioksida projekta sve na jednom mjestu. Program pruža mogućnost izvoženja izvješća o opcijama testiranja i suradnju s inženjerima putem web alata za analizu. Ovisno o potrebi alat za optimizaciju troškova može otključati puni potencijal izvedbe projekta. Korištenjem strojnog učenja za prepoznavanje najboljih tehnoloških opcija za svaki projekt, trošak i optimizacija mogu usmjeriti dizajnerske timove da smanje troškove uz korištenje alata za analizu performansi. Oni uključuju mnogo više značajki koje pomažu u analizi svih aspekata projekta s rezultatima temeljenim na podacima. Usporedbom s osnovnim dizajnom, timovi mogu odrediti materijale i strategije koji najbolje ispunjavaju ciljeve projekta, korištenje vode u projektu također može biti uključeno u analizu. Alat za fasade može se koristiti za brzo proučavanje mnogih opcija dizajna izravno u alatu za analizu. Alat za crtanje može se koristiti za stvaranje naslona i proučavanje detaljnih geometrijskih konfiguracija i građevinskih sklopova, predviđa neograničene mogućnosti s alatom za analizu pojednostavljenih izvedbi dizajna. Uz veću transparentnost dizajna, bolju komunikaciju i prekrasnu grafiku, cove.tool pomaže pridobiti nove poslove i zadržati postojeće klijente.[3] Konzultantske usluge temeljene na umjetnoj inteligenciji, potvrđene od strane stručnjaka, nude smanjenje troškova od 75% po angažmanu na projektu u usporedbi s tradicionalnim konzultantima.[3]



Slika 6 Primjer jednog projekta primjenom cove.tool [4]

## 5. Zaključak

Umjetna inteligencija svakim danim sve više napreduje i usavršava se, ostvarujući povećanu implementaciju u svim područjima primjene. Danas se koriste algoritmi strojnog učenja kako bi pomogli u pružanju preporuka, prijevoda u realnom vremenu, automatskog generiranja teksta ili slika, donošenja samostalnih odluka i još mnogo toga. Posebnu primjenu su pronašli kod raznih uređaja i strojeva jer pružaju mogućnost inteligentnog rada i razmišljanja nalik ljudima. Što je viši stupanj ugrađene inteligencije to će moći obavljati složenije zadatke. Pa je tako AI pronašao svoju primjenu prilikom konstruiranja objekata. Omogućivši voditeljima projekta jednostavno vođenje planiranje i analizu resursa, troškova, željenih rokova, redukciju kašnjenja itd. (npr. korištenje programa Alice). Trenutno, primjenom umjetne inteligencije ne mogu se izvršiti proračuni nosivosti i opterećenja složenih konstrukcija, međutim mogu vrlo jednostavno odrediti energetske učinkovitost, zamjenjujući ljuski radi i pojedinačno računanje u excel-u. Inteligentni strojevi zamijenili su ljude u raznim domenama rada, neki čak rade u interakciji s čovjekom (kobot) pružajući veću produktivnost, sigurnost smanjujući ljudske napore ostvarivši odlične temelje Industrije 4.0. Razvoj automatizacije i pametnih tvornica ključne su stavke ako se želi postići brza učinkovita i produktivna proizvodnja sa samim time konkurentnost na tržištu. Fleksibilnost prilagodljivost proizvodnje pružit će najveće benefite ako se industrijskim robotima ugradi određeni stupanj inteligencije ili ih se zamijeni kobotima.

Važno je ispravno i odgovorno korištenje umjetne inteligencije za ostvarenje njenih maksimalnih benefita. Neće zamijeniti ljude u potpunosti ali je bitno razumjeti njen princip rada kako bi omogućilo buduću razvoj industrije.

## 6. Literatura

- [1] <https://biblus.accasoftware.com/de/ai-in-construction/> **(internet stranica)**
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=NISDfLF6lv4> **(internet stranica)**
- [3] <https://cove.tools/> **(internet stranica)**
- [4] <https://facadesplus.com/covetool/> **(internet stranica)**
- [5] Zhang, Xiang, Lina Yao, Xianzhi Wang, Jessica Monaghan, David Mcalpine, Yu Zhang. A Survey on Deep Learning-Based Non-Invasive Brain Signals:Recent Advances and New Frontiers. // Journal of Neural Engineering, 16(2019), 3; 51-61. (ISSN 1741-2552) **(rad u časopisu)**
- [6] Krstulović, Ante: Uvod u industrijsku robotiku, Zagreb, 2003. (ISBN 953-6091-27-5) **(knjiga/poglavlje u knjizi)**
- [7] Doleček, Vlatko., Karabegović, Isak.: Robotika, 2002. (ISBN 9958-624-12-5) **(knjiga/poglavlje u knjizi)**



# Kontrola kvalitete zavarenih spojeva primjenom automatske detekcije nesavršenosti radioskopijom *Control Quality of welded joints using Automatic Defect Recognition System for Radioscopy*

I. Petrović<sup>1,\*</sup>, M. Stojkov<sup>2</sup>, Z. Markešić<sup>3</sup>

<sup>1</sup>FERIT Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>2</sup>Sveučilište u Slavonskom Brodu, Hrvatska

<sup>3</sup>Hrvatsko društvo za kontrolu bez razaranja, Zagreb, [www.hdkbr.hr](http://www.hdkbr.hr)

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [ipetrovic81@gmail.hr](mailto:ipetrovic81@gmail.hr)

## Sažetak

Automatsko prepoznavanje nesavršenosti (ADR), za digitalnu radiografiju, u području metoda nerazornih ispitivanja (KBR, engl. NDT) u središtu je mnogih istraživanja posebno je važno kako za domaću, tako i za međunarodnu industriju. Automatska digitalna radiografija primjenjuje se uglavnom za automatsku kontrolu proizvoda aluminijskih odljevaka uglavnom se primjenjuje u automobilske industriji radi dobivanja brzih podataka o ispitivanju. Međutim u slučaju kontrola zavarenih spojeva još uvijek se smatra izazovnim i složenim procesom. Ovaj rad predstavlja originalni razvijeni sustav prepoznavanja nesavršenosti za digitalnu radiografiju u stvarnome vremenu (RTR), zavarenih spojeva lima. RTR sustav s ADR-om sastoji se od rendgenske opreme, uređaja za manipulaciju komada, od izvora rendgenskih zraka, digitalnog panela-detektor, uređaj za snimanje s pripadajućim softwareom za dobivanje i obradu slike i posebnim ADR softwareom za prepoznavanje grešaka, skeniranje kroz digitalnu rendgensku sliku zavarenog spoja čelična lima i prepoznavanje nesavršenosti ako ih ima, i donosi odluku o prihvaćanju/odbijanju na temelju Standarda prihvatljivosti. Ovaj algoritam temelji se na umjetnoj neuronskoj mreži (ANN) može učiti i razvijati se prilikom svakog dijela kontrole uzoraka koji obavlja. To će povećati pouzdanost za otkrivanja nesavršenosti i procjenu kvarova. Pred procesor koristi koncepte digitalne obrade slike, analize slike i prepoznavanje uzorka zavara s raznim vrstama diskontinuiteta. Ovaj sustav zamjenjuje ručnu procjenu i eliminira povezano poput subjektivnosti, nedosljednosti, umora i postiže bržu i pouzdaniju evaluaciju.

**Ključne riječi:** Nerazorna ispitivanja (NDT), Digitalna radiografija (RT-D), Automatsko prepoznavanje nesavršenosti (ADR).

## Abstract

Automatic defect recognition (ADR) in the case of NDT, especially for Digital Radiography is currently a focus of much research at home and abroad. There are ADR systems available

for Digital Radiographic inspection of products like casting. However, in the case of many type of weld joints, ADR is still considered as a challenging and complex process. This paper introduces an indigenously developed Automatic Defect Recognition System for Real Time Radioscopy (RTR) of welded joints. The RTR system with ADR consists of a constant potential X-Ray equipment, with swiveling arrangement, as the X-Ray source, Digital Flat Panel (DFP) as the Detector/Imaging device, with its associated Software for Image acquisition and Review of the Digital X-Ray images, and a special ADR software for Defect recognition and Evaluation of the weld joint. Automatic Defect Recognition Algorithm, scans through the Digital X-Ray Image Weld joint, and recognizes the detects, if any, and takes the decision of Acceptance / Rejection, based on the Acceptance Standards. This Algorithm which is based on an Artificial Neural Network (ANN) is capable of learning continuously, and grow in capability, with every joint it evaluates. This will enhance the reliability of defect detection and evaluation. The preprocessor uses concepts from digital image processing, image analysis, and pattern recognition. It also involves validation of the system with a wide range of weld samples with various types of discontinuities. This system replaces manual evaluation and eliminates the associated problems like subjectivity, inconsistency, fatigue etc and accomplishes a faster and more reliable evaluation.

**Key words:** Non destructive testing (NDT) , Digital Radiography (RT-D), Automatic defect recognition (ADR).

## 1. Uvod

Radiografija je vrlo dobro uspostavljena kao tehnika ispitivanja nerazornim metodama (NDT) koristeći film i elektronički sustav za detekciju X-zrakama. U glavnom se koristi u naftnoj, petrokemijskoj i nuklearnoj industriji, a posebno za industrije za proizvodnju električne energije, za kontrolu zavarivanja. Radiografija je odigrala važnu ulogu u osiguravanje kvalitete dijela ili cijele komponente, u skladu s zahtjevima standarda i specifikacija. Međutim radiografija je spora, skupa i opasna metoda, posebno za masovnu proizvodnju, gdje tisuće zavarenih spojeva treba ispitati svaki dan. Loša kvaliteta radiografskih slika posljedica je fizičke prirode radiografije, odnosa veličine i položaja grešaka i njihova orijentaciju u odnosu na debljinu ispitivanog dijela [1].

Došlo je do značajnog razvoja istraživanja u području radiografije u posljednjih nekoliko desetljeća, rezultirajući u mnogim tehnologijama poput radioskopije u stvarnom vremenu, digitalne radiografije, i računalne radiografije itd. Ovi izumi znatno su unaprijedili kvalitetu i produktivnost radiografskog ispitivanja kroz smanjenje radiografskog ciklusa eliminacijom kemijske obrade filma i aplikacije za obradu slike.

Interpretacija radiografskih snimaka još uvijek se izvodi ručno [2]. Interpretacija pogrešaka u zavarenim spojevima, zamorna je i subjektivna, ovisi o iskustvu i znanju RT ocjenjivača, inspektora [3].

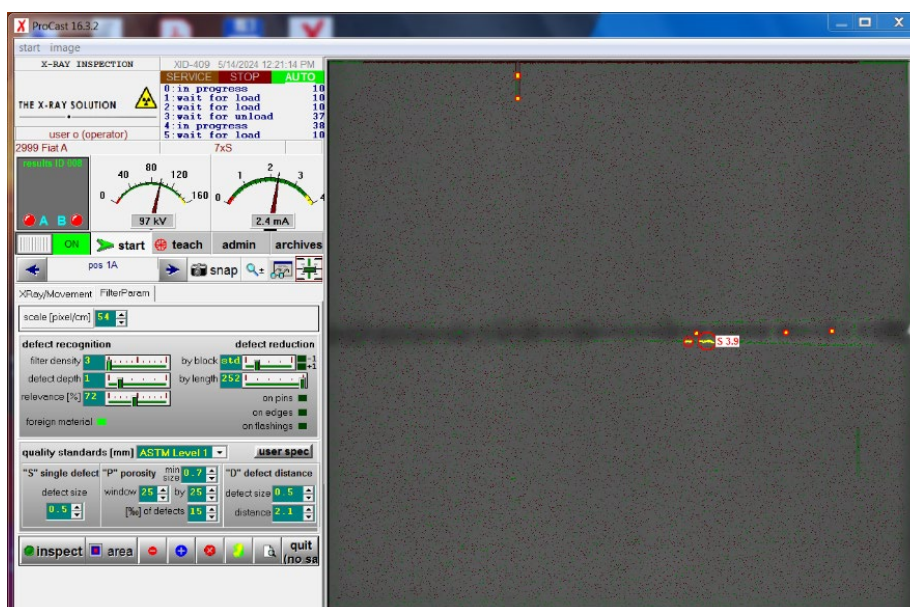
Osobe koje provode ocjenjivanje RT snimaka nisu uvijek dosljedne i učinkovite kod ispitivanja proizvoda, jer su zadaci monotoni i iscrpljujući. Tipično postoji jedan odbijen u stotinama prihvaćenih proizvoda.

Vizualnim pregledom pozicija, operater je učinkovit u 80 % slučajeva. Da bi se postigla 100 % ljudska kontrola, gdje je potrebno svaki proizvod temeljno provjeriti, zahtjeva veliku razinu redundancije čime se povećava trošak i vrijeme pregleda [4]. Pri tome dolazi do važnosti razvijanja automatizacije, koja smanjuje ljudski angažman, čime je kontrola postala pouzdanija i brža.

## 2. Automatska evaluacija zavarenih spojeva

Ručna evaluacija ima ograničenja poput subjektivnosti, dok automatska evaluacija daje brže rezultate, pouzdanija je i uklanja ljudsku subjektivnost, ljudski faktor.

Stoga se donosi odluka o korištenju programa za automatsko prepoznavanje grešaka, koji će na osnovu programa koji se izradi da se ispitati cijeli zavareni spoj, u nekoliko ekspozicija time će prepoznati greške ako postoje u zavarenom spoju, donijeti zatim odluku o prihvaćanju ili odbijanju, na osnovi propisanog standarda prihvaćanja, prikazano na slici 1.



**Slika 1.** Snimka zaslona radiografska slika u ProCast programu s detekcijom grešaka.

Koristi se ADR tehnologija koja se primjenjuje u prepoznavanju grešaka u aluminijskim odljevcima [8], posebno za aluminijske kotače, komponente od magnezija [9] i zavarene spojeve [10].

Međutim ne postoje dostupni paketi programa za prepoznavanje grešaka na zavarenim spojevima čelika ili sličnih komponenti koje sadrže veću količinu zavarenih spojeva. Ovisno o složenosti komponente za kontrolu, potrebno je izraditi algoritam izrađen po narudžbi, posebno dizajniran za traženu ispitnu komponentu. Izrada algoritma je složena, koji mora sadržavati u sebi domensku stručnost, također mora biti rigorozno validan. Stoga je potrebno razvijati ADR program posebno za osjetljivije dijelove komponenti, koje su izvrtnute velikim naprezanjima, isto tako posebno se razvija za dijelove komponenti na kojima je manja razina kontrole zahtijevana. ADR sustav za kontrolu zavarenih spojeva, treba davati dobru kvalitetu slike X- zrakama. U konvencionalnim RTR sustavima koristi se



sustav s pojačivačem slike, koji zadovoljava osnovnu kvalitetu slike, gleda se nepovoljno na ADR kontrole zbog svojih inheretnih ograničenja poput ograničene razlučivosti, lošeg omjera signala i šuma (SNR), niskog kontrasta, nelinearnost i ograničen dinamički raspon. Iako, korištenjem tehnika obrade slike, kvaliteta slike znatno je poboljšana, zbog degradacije slike pojačalo tijekom određenog vremena gubi svoju snagu, stoga slike ne zadovoljavaju svoju oštrinu prema zahtijevanom stupnju. Stoga za razvoj ADR sustava odlučeno je krenuti na digitalnu radiografiju sa ravnim digitalnim panel detektorima, kao uređajima za slikanje umjesto pojačivačima slike.

### 3. Digitalni panel detektor za ADR sustav

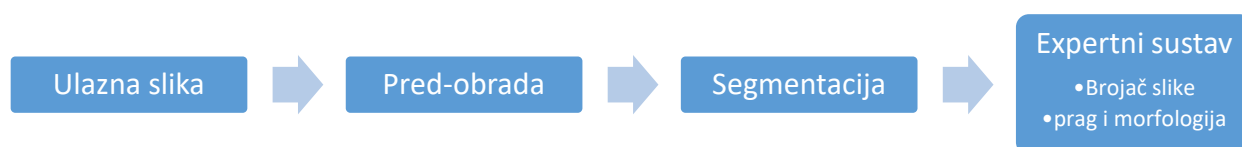
Digitalna radiografija [11] je metoda ispitivanja pomoću rendgenskih zraka i digitalnih ravnih detektora (FPD) u kojima se rendgenska slika prikazuje izravno na računalu bez intermedijarnih optičkih pomagala ili mehaničkog skeniranja. Upadne X-zrake pretvaraju se u električni naboj i zatim pretvaraju u digitalnu sliku velike površine.

U usporedbi s drugim uređajima za snimanje FPD pruža visoku kvalitetu digitalne slike, veći omjer signala i šuma, i dinamiku od 12 do 16 bita [12], što osigurava visoku osjetljivost za primjenu u radiografiji.

Središnji sustav koristi ravni panel od amorfnog silicija (RAD-icon 2022), s glavnim specifikacijama - Aktivno područje 204,8×204,8 mm<sup>2</sup>, Matrica piksela: 1024×1024, veličina piksela 200 μm, dinamički raspon osjetljivosti 80 dB, Primjenjivo na radnom području napona: 15 - 450 kV. Slike dobivene ravnim panelima na računalu se prikupljaju i pregledavaju u DICONDE formatu.

### 4. ADR algoritam [13-16]

Algoritam za automatsko prepoznavanje grešaka sastoji se od nekoliko stupnjeva i prikazan je na slici 2.

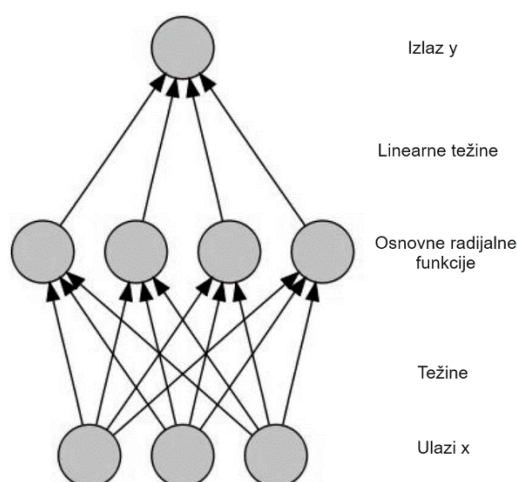


**Slika 2.** Koraci ADR algoritma

Pristup koji slijedi je: digitalna obrada slike, izdavanje značajki i uzrok kvalifikacija. Tehnike obrade radiografske slike koriste se za izvući glavne objekte (pogreške u zavarima). Obično su to nedostaci u originalnoj rendgenskoj snimci, slika ima mali broj u usporedbi s pozadinom informacija, te pomiješana sa šumovima koji dolaze iz raznih procesa u formiranju rendgenske slike.

Tehnike za obradu digitalne slike poput smanjenja buke, poboljšati kontrast, tkao da glavni objekti mogu biti vidljivi od pozadine. Ekstrakcija nesavršenosti je neophodna za dobivanje skupa nesavršenosti koje mogu opisati greške koje nastaju nakon zavarivanja.

Nesavršenosti se koriste u području, nakupine, količina identificiranih nedostataka. Oblici grešaka su pore, troska, nedostatak spajanja, pukotine. Klasifikacija grešaka potrebna je za analizu podataka, iz kojih se može napraviti predviđanje za popravljjanje nastaloga kvara, da ne dođe do većih havarija. Klasifikacijski algoritam grešaka može se razlikovati u učinkovitosti i točnosti. Izdvajanje potencijalno neispravnog dijela zavarena spoja zbog nedopuštenih nedostataka. Područja grešaka mogu se naći na različitim mjestima, mogu biti različito orijentirani u često neprecizne granice. Klasifikacija uzoraka grešaka potrebna je za analizu podataka, tako i za predviđanje grešaka. Algoritmi umjetnih neuronskih mreža istraženi su u ovoj studiji. Stručnjak iz područja NDT ispitivanja angažiran je oko razvoja i jačanja ANN mreže, slika 3.



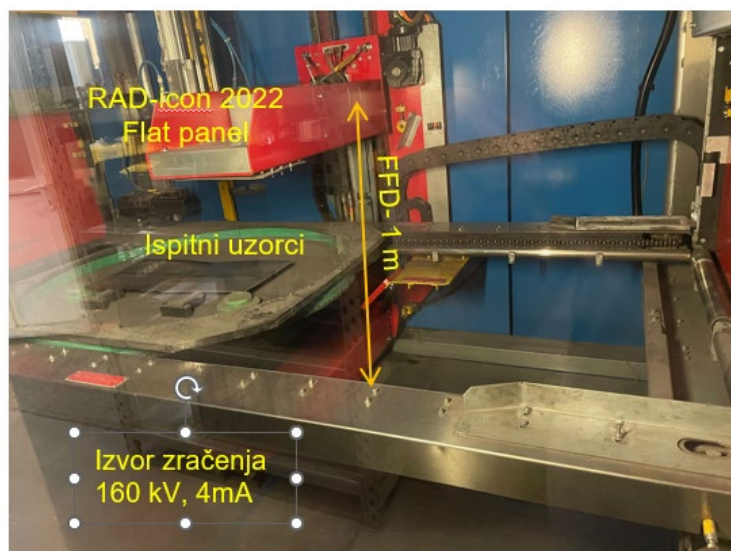
**Slika 3.** Struktura RBF neuronske mreže

Datoteke za obuku periodički se ažuriraju. Mreža osnovnih zadaća (RBF) osposobljena je za klasificirati nedostatke na temelju izdvojenih značajki. Razvijen je poseban algoritam temeljen na posebnim pravilima koji ima svrhu prepoznavanja nesavršenosti. RBF mreža umjetna je neuronska mreža koja koristi radijalne osnovne funkcije, kao aktivacijske funkcije. Ona aproksimira nepoznatu funkciju kao linearna kombinacija radijalnih baznih funkcija. Vrijeme obrade slike iznosi 2-3 sekunde na računalu.

ANN algoritam je samoučeći algoritam koji se stalno obnavlja pri izlaganju novim podacima. Ovo svojstvo ANN-a omogućuje ADR-u da ostane otporan na suptilne i prihvatljive promjene procesa tijekom određenog vremenskog razdoblja. RBF klasifikator može se iz testirati s nekoliko manjih uzoraka, kako bi se dobila optimalna podjela, tako da ima prednost za male uzorke. Transformira nelinearnu klasifikaciju problema uzorka do problema linearne klasifikacije u značajke prostora.

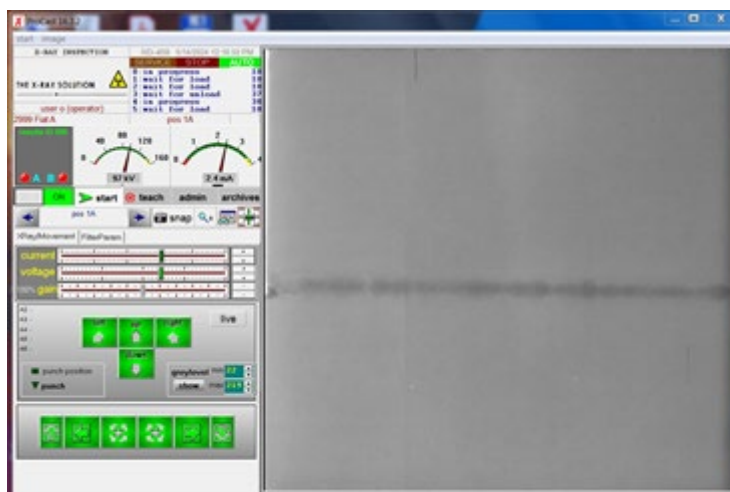
## 5. Ispitivanje zavarenog spoja digitalnom radiografijom u realnom vremenu

Sučeonu zavareni spoj podliježe 100 %-tnoj kontroli kvalitete radiografijom. U ovom slučaju koristiti ćemo digitalnu radiografiju u stvarnome vremenu, prikazano na slici 5.



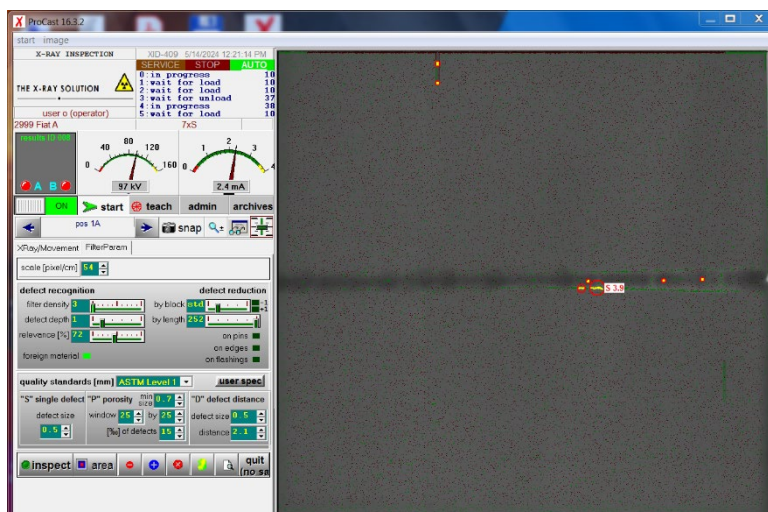
**Slika 4.** Unutrašnjost kabine stroja za digitalnu radiografiju i automatsko prepoznavanje grešaka (ADR)

RTR (Real Time Radiography) sustav sastoji se od izvora X-zraka, rendgenske cijevi, fokusa  $1 \times 1$  mm, generatora napona 160 kV, 4 mA, panela RAD-ikon 2022 za dobivanje vidljive slike pomoću X- zraka. Digitalne slike u realnome vremenu prikazuju se na monitoru uređaja XC01-1100 [5]. Za podešavanje snimanja uzoraka i obradu slike koristi se softwer ProCast, slika 6.



**Slika 6.** Snimka zaslona ProCast ver.14.3.2, komande za manipulaciju tacni, digitalna slika zavarena spoja

Podešavanje ekspozicija vrši iskusni operater koji ima položen tečaj iz RT- stupanj 2, prema EN ISO 9712:2022 . Odluke o prihvaćanju ili odbacivanju ispitnih uzoraka radi se prema zahtjevima kupca ili i određenim propisima i standardima, postavke koje se unose da se uočavaju nesavršenosti prikazuje slika 7. u postavkama ProCast programa [6].



Slika 7. Slika zaslona ProCast program s uključenim postavkama detekcije nesavršenosti.

## 6. Rezultati eksperimenta

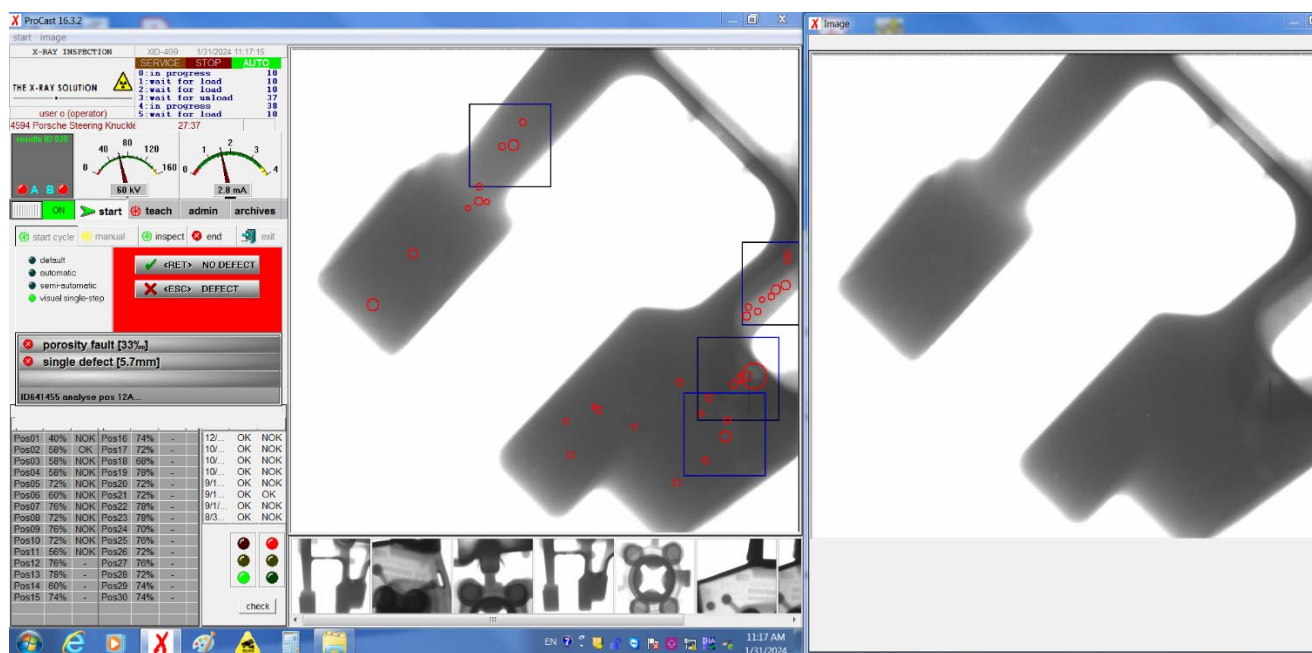
Za procjenu performansi sustava za automatsko prepoznavanje grešaka, odabrano je 120 slika zavarenih spojeva. Tipovi grešaka uključuju trosku, pore, nakupine pora, nedovoljan provar, nedostatak spajanja. Sustav za klasifikaciju grešaka koristi RBF neuronsku mrežu. Mreža se trenira mijenjanjem broja skrivenih čvorova (osnovnih funkcija) i parametar poznat kao „sigma faktor“ koji određuje razinu preklapanja između susjednih, osnovnih radijalnih funkcija, rezultati rada softvera dani prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati RFB mreže

*Broj Treniranog uzorka	Broj ispitnog uzorka	Broj ulaza	Broj izlaza	Bias funkcija	Sigma faktor	Trening %	Ispitivanje %
140	73	4	3	40	10	90,71	80,82
445	257	3	3	47	29	82,92	82,8794
445	257	5	3	115	31	85,12	81,3230
257	257	7	3	164	38	87,42	81,7121
236	328	3	3	29	46	84,75	86,28
39	16	3	2	10	10	84,62	93,75
597	251	3	2	62	50	98,4925	86,45

- Broj uzorka posjeduje zasebne nesavršenosti.

Slika 8 prikazuje snimku zaslona softvera ProCast za ADR kontrolu prepoznavanje grešaka. Crvene oznake na digitalnoj slici prikazuju uočene nedostatke na ispitnom objektu. Plavi kvadratići dimenzija su 20×20 mm, u kojima je uočena poroznost i automatski izračuna se % dopuštene poroznosti u ispitnom dijelu komada.



Slika 8. Snimka zaslona ADR programa s uočenim greškama

## 7. Zaključak

ADR algoritam radi u dvije faze, prepoznavanje grešaka, zatim i njihovu klasifikaciju. Proces prepoznavanja grešaka sastoji se od pred-procesiranja, segmentacije, identifikacije/razdvajanje i izdvajanje grešaka. Klasifikacija grešaka provodi se u dva koraka, osnovnim i naprednim. Osnovna klasifikacija grešaka ili gruba klasifikacija grešaka razvrstava nesavršenosti u dvije klase. Klasa I je troska i pora su u istoj skupini, dok je klasa II nedostatak fuzije i nepotpuna penetracija. U slučaju ove II klase grešaka, rezultati su postignuti u 93,75 % točnosti. Napredna klasifikacija grešaka sastoji se od tri klase: klasa I je pora, klasa II je šljaka ili troska, a klasa III je nedostatak spajanja i nepotpuna penetracija. U ovom slučaju je 86,28 %. Međutim, kontinuiranom obukom i korištenjem više uzoraka može biti poboljšana izvedba.

Ova studija otkriva da transformacija iz ručne u kontrole RTR sustava ispitivanja s pojačivačem slike, do sustava ADR-a sa sustavom s digitalnom radiografijom, rezultira s poboljšanom vjerojatnošću otkrivanja grešaka i veća pouzdanost uklanjanja subjektivnosti operatera. Kontinuiranom obukom ANN sustava, performanse sustava znatno su povećane i prikladne za zavare. ADR algoritam koristi ANN u načinu samoučenja za kontinuirano poboljšanje performansi ADR sustava. Sustav djeluje kao specijalistički paket za zavarene spojeve, međutim može se proširiti opseg ovog istraživanja i na druge konfiguracije zavara, npr. za tanko stijene zavarene komponente gdje se koristi RTR sustav kontrole.

## 8. Literatura

- [1] Nacereddine N; Zelmat M; Belaïfa S S; Tridi M. Weld defect detection in Industrial Radiography based digital image processing, Proceedings of world academy of science, engineering and technology, 2005. 2(1307-6884).

- [2] Fucsok F; Scharmach M; Human factors: The NDE reliability of routine radiographic film evaluation, Proceedings of 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Roma 2000. <http://www.ndt.net/article/wcndt2000/papers/idn740/idn740.htm>,.
- [3] Lim T Y; Ratnam M M and Khalid M A. Automatic classification of weld defect using simulated data and an MLP neural network, Insight, 2007. 49(3) p 154-159.
- [4] Domingo Merry. Workshop on Digital Radiography, GE Global Research Centre, Bangalore, 2005.
- [5] Lim T Y, Ratnam M M and Khalid M A, Automatic classification of weld defect using simulated data and an MLP neural network, Insight, 2007. 49(3) p 154-159.
- [6] ASME Section I.
- [7] ASME Section V.
- [8] Frank Herold; Rolf-Rainer Grigat. A New Analysis and Classification Method for Automatic Defect Recognition in X-Ray Images of Castings, Paper presented at the 8th ECNDT, Barcelona, June 2002
- [9] Veronique Rebuffel, Subash Sood, Defect Detection Method in Digital Radiography for Porosity in Magnesium Castings.
- [10] Bonser G; Fawson S WQ, Defect detection in partially complete SAW and TIG welds using on-line radioscopy and image processing, Miguel Carrasco and Domingo Mery, Segmentation of welding defects using robust algorithm.
- [11] Pardikar R J. Digital Radiography and Computed Radiography for enhancing the quality and Productivity of welds in Boiler components, 2008. 17th WCNDT, Shanghai, China, October
- [12] Ravindran V R. 'Digital Radiography Using Flat Panel Detector for the Non-Destructive Evaluation of Space Vehicle Components', 2005. Journal of Non-Destructive Testing & Evaluation, 4(2).
- [13] Du C -J; Sun D -W; Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation, 2004. Trends Food, Sci. Technol. 15, 230–249.
- [14] Inoue K and Sakai M, Automation of inspection for weld", Trans. Of Japanese Welding Research Institute, 1985. Osaka University, 14(1) pp. 35-44.
- [15] Aoki L and Suga Y. Application of artificial neural network to discrimination of defect type in automatic radiographic testing of welds, 1999. ISIJ Int., 39(10) 1081–7.
- [16] Daum W; Rose P; Heidt; Builtjes J H. Automatic recognition of weld defects in X-Ray inspection, 1987. Br J NDT, 29(2) 79–82.
- [17] Petrović Ivan; Stojkov Marinko; Samardžić Ivan. Determination of wagon axels quality by NDT methods, 2017. HDKBR INFO Magazin, Vol. 7 NO.1.