

# Zajednički temelji 2022

---

## Edited book / Urednička knjiga

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Publication year / Godina izdavanja: **2022**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:693576>

Rights / Prava: [Attribution-ShareAlike 4.0 International/Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)



2022 ZAJEDNIČKI  
TEMELJI

# ZBORNİK RADOVA

devetog skupa mladih istraživača iz područja  
građevinarstva i srodnih tehnički znanosti

28.-30. RUJNA  
2022



UDRUGA HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH FAKULTETA



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI  
FAKULTET OSIJEK



2022 ZAJEDNIČKI  
TEMELJI

---

Zbornik radova

9. Skupa mladih istraživača iz područja građevinarstva i  
srodnih tehničkih znanosti

---

*Osijek, 28. – 30. rujna 2022. godine*

Urednici: Hrvoje Krstić  
Filip Anić  
Mario Jeleč

Izdavač: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Grafičko  
oblikovanje: Mihaela Domazetović  
Kristina Jeleč

Medij: Elektronički (web)  
<http://www.gfos.unios.hr/zt2022/zt-2022>

ISBN: 978-953-6962-67-9

---

Organizacijski odbor

Hrvoje	Krstić	Predsjednik			
Anić	Filip	Član	Kaluđer	Jelena	Član
Brandis	Adriana	Član	Obradović	Dino	Član
Bušić	Robert	Član	Vrdoljak	Ivan	Član
Domazetović	Mihaela	Član	Zagvozda	Martina	Član
Jeleč	Mario	Član	Željko	Šreng	Član
Jeleč	Kristina	Član	Zvonarić	Matija	Član

Pokrovitelji



**TURISTIČKA ZAJEDNICA  
OSJEČKO-BARANJSKE  
ŽUPANIJE**

Turistička zajednica Osječko-  
Baranjske županije

Županijska ul. 4, 31000, Osijek



Karolina d.o.o.

Vukovarska cesta 209a, 31000,  
Osijek

Organizator



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Sjedište



Ulica Vladimira Preloga 3  
31000 Osijek  
Hrvatska

## Sadržaj

DIGITALNO-FIZIČKI SUSTAVI I DIGITALNI BLIZANCI U KONTEKSTU GRAĐEVINARSTVA 4.0 Hana Begić, Mario Galić .....	1
MJERENJE NABORANOSTI TRAJNICA NA TRAMVAJSKOM KOLOSIJEKU Krešimir Burnać, Ivo Haladin .....	9
UTJECAJ VRSTE I KOLIČINE SUPERPLASTIFIKATORA NA SVOJSTVA BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM Robert Bušić, Ivana Miličević, Zoran Lukić.....	19
HIBRIDNI SUSTAVI I ODRŽIVA VODOOPSKRBA RE-WATER Tatjana Džeba .....	27
ULOGA KEMIJSKIH DODATAKA ZA SAMOCIJELJENJE NA OTPORNOST CEMENTNIH KOMPOZITA NA CIKLUSE SMRZAVANJA I ODMRZAVANJA Anita Gojević, Ivanka Netinger Grubeša .....	35
PRELIMINARNA ANALIZA PONAŠANJA JEDNOSTAVNE ALUMINIJSKE KONSTRUKCIJE IZLOŽENE NESTACIONARNOM ZAGRIJAVANJU Marko Goreta, Neno Torić, Ivica Boko .....	41
EKSPERIMENTALNA STUDIJA PRIMJENE LOKALNOG DRVA LISTAČA U IZRADI LIJEPLJENIH LAMELIRANIH NOSAČA Tin Hrzić .....	49
RAZVOJ MODULA DRVENE ZIDNE OBLOGE - analiza dimenzija, proporcija i oblika Krajnović Marija, Domagoj Mamić, Brzić Luka .....	57
ODREĐIVANJE POLOŽAJA OBALNE LINIJE I PRORAČUN ŠIRINE PLAŽE NA TEMELJU VIDEO- NADZORNOG SUSTAVA- PRIMJER PLAŽE PLOČE U RIJECI Hanna Miličević, Dalibor Carević, Damjan Bujak .....	65
PROBLEMATIKA ODLUČIVANJA U UVJETIMA NEIZVJESNOSTI Dino Obradović .....	71
OBLAK TOČAKA I NURBS U IZRADI BIM ELEMENTA MODULA(RNE) ZIDNE OBLOGE Raguž-Lučić Nikolina .....	79

PONAŠANJE U POŽARU NOSIVOG KOMPOZITNOG LAGANOG PANELA S GORIVIM TOPLINSKO-IZOLACIJSKIM SLOJEM Tomislav Ščapec, Marija Jelčić Rukavina .....	87
ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ SAMOZBIJAJUĆEG BETONA I BETONA ZA 3D PRINTER S DODATKOM BIOPEPELA Luka Virovkić, Damir Varevac .....	93
UTJECAJ RAZLIČITIH NANOMATERIJALA U GLINENIM KOMPOZITIMA NA PRODOR ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA Ivan Vrdoljak, Ivana Miličević, Slavko Rupčić .....	101
NUMERIČKO MODELIRANJE PONAŠANJA DEMONTAŽNE POSMIČNE VEZE SPREGNUTIH NOSAČA IZVEDENIH OD HLADNO OBLIKOVANOG ČELIKA I BETONA Vlaho Žuvelek, Ivan Ćurković .....	107
UTJECAJ RECIKLIRANE GUME NA TLAČNU ČVRSTOĆU CEMENTOM STABILIZIRANIH MJEŠAVINA Matija Zvonarić.....	117
NUMERIČKA ANALIZA SPREGNUTOG SUSTAVA HLADNO OBLIKOVANI ČELIK - BETON S DEMONTAŽNIM POSMIČNIM SPOJEM Andrea Rajjić, Ivan Lukačević.....	125
INDEKS AUTORA .....	131



The background of the top half of the page features several overlapping, semi-transparent geometric shapes, primarily triangles and quadrilaterals, in shades of gray. These shapes are arranged in a way that creates a sense of depth and movement, with some appearing to be in the foreground and others receding into the background. The overall effect is a modern, architectural aesthetic.

# DIGITALNO-FIZIČKI SUSTAVI I DIGITALNI BLIZANCI U KONTEKSTU GRAĐEVINARSTVA 4.0

## Cyber-Physical Systems and Digital Twins in the Context of Construction 4.0

**Hana Begić<sup>1</sup>, Mario Galić<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, hbegic@gfos.hr; mgalic@gfos.hr



## Sažetak

Očekuje se da će četvrta industrijska revolucija odnosno Industrija 4.0 donijeti rast, poboljšanje i ubrzani razvoj većini industrija u bliskoj budućnosti, no s obzirom na dugotrajne i uvriježene metode rada, uvođenje koncepta Građevinarstva 4.0 i novih tehnologija je i bit će veliki izazov za tu industriju. Među ostalima, neke od novih tehnologija koje ova industrijska revolucija donosi su i digitalno-fizički sustavi te digitalni blizanci. S obzirom na to da podrazumijevaju podatke ažurirane u stvarnom vremenu u kombinaciji s računalima u virtualnom okruženju oni omogućuju rješavanje problema s mnogo stajališta, a u konačnici i poboljšanje građevinskih procesa. Pomoću primjene digitalno-fizičkih sustava te digitalnih blizanaca, moguće je povećati učinkovitost u projektu, postići pravovremeno donošenje odluka te osiguranje sigurnosti na radu i postizanje ugovorene razine kvalitete.

*Ključne riječi: digitalno-fizički sustavi, digitalni blizanci, Građevinarstvo 4.0*

## Abstract

The fourth industrial revolution, i.e., Industry 4.0, is expected to bring growth, improvement, and accelerated development to most industries in the near future, but given the longly established working methods, the introduction of Construction 4.0 and new technologies is and will be a great challenge for the industry. Among others, the new technologies that this industrial revolution brings are cyber-physical systems and digital twins. Since they involve real-time updated data in combination with computers in a virtual environment, they allow problem solving from many points of view and, ultimately, construction process improvement. With the application of cyber-physical systems and digital twins, it is possible to increase efficiency in the project, achieve timely decision-making, ensure construction site safety and achieve the contracted level of quality.

*Keywords: cyber-physical systems, digital twins, Construction 4.0*

## 1. Uvod

Očekuje se da će četvrta industrijska revolucija (4IR), koja se kolokvijalno naziva Industrija 4.0, donijeti rast, poboljšanje i ubrzani razvoj većini industrija u bliskoj budućnosti. U usporedbi s prethodnim industrijskim revolucijama, 4IR bi zbog trendova globalizacije mogla biti prva revolucija istovremeno aktivna u većini dijelova svijeta. Industrije koje su već usvojile 4IR izvještavaju da su promjene izazvane 4IR uglavnom potaknute pojavom tehnologija kao što su digitalno-fizički sustavi (engl. Cyber-physical systems – CPS), digitalni blizanci (engl. Digital Twins – DT), informacijsko modeliranje građevina (engl. Building Information Modeling – BIM), internet stvari (engl. Internet of Things – IoT) i ostale. Navedene tehnologije su u određenoj mjeri već promijenile većinu industrija, dok istovremeno neke industrije još uvijek ne usvajaju pune potencijale 4IR. Primjer takve djelomične implementacije navedenih tehnologija je i građevinarstvo koje se u svjetlu 4IR-a naziva Građevinarstvo 4.0 (engl. Construction 4.0). Uvođenje koncepta Građevinarstva 4.0 i novih tehnologija je i bit će veliki izazov za industriju koja se obično smatra sporom pri usvajanju promjena. Međutim, smatra se da je građevinska industrija kontinuirano u fazi napretka te inovacije pokazuju golem doprinos značajnih aspekata kao što su sigurnost na radu, održivost, izvedba projekta, praćenje gradilišta, automatizacija građenja itd. 4IR integrira informatičke sustave s fizičkim sustavima kako bi nastao CPS [1], a ti sustavi omogućuju komunikaciju između strojeva na način sličan društvenim mrežama s obzirom na to da se mogu spojiti na mrežu i razmjenjivati informacije putem virtualnih sučelja [2]. Može se reći da je CPS svaki fizički sustav koji je povezan s računalom te se sastoji od fizičkog dijela (uređaj, stroj ili građevina) i digitalnog dijela (podaci, softverski sustav ili komunikacijska mreža) [3]. Smatra se da 4IR uglavnom ovisi o izgradnji CPS-a kako bi se proizvodnja usmjerila prema višoj razini digitalizacije, prilagođenosti informacijama i održivosti [4]. Omogućujući tijesnu vezu između informatičkih sustava i pridruženih fizičkih sustava, CPS nudi mehanizam za timove građevinskih projekata kako bi se premostio jaz između virtualnih modela i fizičke građevine te se stoga može smatrati osnovom Građevinarstva 4.0 [5]. Takav bi se sustav trebao moći prilagoditi promjenama na gradilištima i povezati virtualnu građevinu s fizičkom građevinom pomoću senzora ili tehnologija za prikupljanje podataka koji signaliziraju promjene na građevini i aktuatora koji nakon primitka signala poduzimaju potrebnu radnju [6, 7]. Slično navedenom, DT je virtualni model koji točno odražava

fizičku građevinu [8]. Građevina koja se prati opremljena je raznim sensorima koji prikupljaju podatke o performansama kao što su energija, temperatura, vremenski uvjeti i slično. Ti se podaci zatim proslijeđuju u sustav za obradu i primjenjuju na digitalnu kopiju građevine. DT podrazumijeva dvosmjernan transfer informacija koji se prvo događa kada senzori građevine šalju relevantne podatke procesoru sustava, a zatim kada se podaci stvoreni od strane procesora upotrebljavaju za analizu ili poduzimanje korektivnih mjera [8]. Konceptualno, DT se može smatrati specifičnom vrstom CPS-a jer podrazumijeva povezivanje fizičkih sustava s njihovim odgovarajućim virtualnim prikazom pomoću računalnih resursa. Da bi DT postojao, mora postojati veza digitalnog svijeta prema fizičkom i obrnuto [9]. No, za razliku od CPS-a, DT se usredotočuje na interakciju jedan na jedan između fizičkog i odgovarajućeg virtualnog entiteta, dok CPS naglašava interakciju na više razina što može rezultirati interakcijama jednog prema više entiteta.

## **2. Primjena CPS-a i DT-a u građevinarstvu**

### **2.1. Primjena CPS-a u građevinarstvu**

U kontekstu građevinarstva, most fizičkog prema digitalnom svijetu predstavljaju građevinski elementi i procesi koji se prate pomoću senzora i drugih sustava praćenja [5]. Ključnim napretkom implementacije CPS-a u građevinarstvu može se smatrati poboljšana sigurnost na radu, budući da se predviđa da će voditelji projekta i stručnjaci za sigurnost imati pristup lokacijama zaposlenika i opreme u svakom trenutku [10, 11]. Štoviše, senzori za nadzor građevine mogu otkriti neispravne konstrukcijske elemente, primjerice senzori pričvršćeni na armaturu mjere temperaturu betona u vremenu te utvrđuju ostvarenu čvrstoću betona. U radu [5] prikazano je istraživanje u kojem je analizirana primjena CPS-a u različite svrhe u građevinarstvu, primjerice za praćenje stanja konstrukcijskih elemenata, nadzor privremenih građevina i sigurnost pokretnih dizalica. Nadalje, model pod nazivom Petri Net [12] usvojen je kao digitalni model za proces građenja u CPS-u te su simulirana dva scenarija: primjene automatske montaže i tradicionalnog zidanja konstrukcija. U radu [13], prikazan je slučaj izgradnje jedne javne građevine za provjeru tehničke izvedivosti i učinka implementacije CPS okvira u kojem model građevine u stvarnom vremenu djeluje kao DT građevine u izgradnji. Zaključeno je da budući planovi više neće biti fiksirani i unaprijed definirani, nego će zahvaljujući

praćenju u stvarnom vremenu biti moguće izraditi i prilagoditi planove prema stvarnoj situaciji u procesu građenja.

## 2.2. Primjena DT-a u građevinarstvu

Koncept i potencijal DT tek treba u potpunosti istražiti u građevinarstvu. Posljednjih godina, koncepti pametnih zgrada i pametnih gradova postupno su usvojili DT za postizanje digitalnog upravljanja građevinama dok u isto vrijeme oni pružaju i inovativan pristup upravljanju izgradnjom [14]. Autori u radu [15] analizirali su primjene i istaknuli potencijale daljnjeg istraživanja primjene DT u građevinarstvu te ih identificirali kao ključne za poboljšanje životnog ciklusa projekta kroz praćenje napretka izvedbe projekta te stvaranjem baze podataka za buduće projekte, posebno u fazi koncipiranja, građenja te održavanja. Budući da koncepti građevina i infrastrukturnih sustava počinju od faze projektiranja, autori u radu [16] razvili su okvir za proširenje BIM-a na DT u građevinarstvu. Predložili su nekoliko tehnologija i tehnika kao što su senzori, simulacijski modeli i umjetna inteligencija kao instrumente za poboljšanje sposobnosti BIM-a kao DT građevina. Nadalje, autori u radu [17] pokazali su kako računalne metode i algoritmi mogu pomoći u izradi DT i kako se ti tijekom rada mogu koristiti za pronalaženje optimalnih i heurističkih rješenja u projektima. Na slici 1 prikazan je proces stvaranja digitalnog blizanca izgradnje s BIM modelom na primjeru betonske klupe u okolini Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. Input je BIM model s potrebnim podacima vezanim uz model, slijedi snimanje podataka u stvarnom vremenu, zatim integracija tih podataka u oblak točaka te se na temelju navedenog provodi integracija podataka i njihova analiza i naposljetku se kreira DT.



**Slika 1.** Proces stvaranja digitalnog blizanca izgradnje s BIM modelom

### 3. Zaključak

Pojava i implementacija 4IR te inovativnih tehnologija CPS i DT koje ona donosi omogućuju značajno poboljšanje procesa u životnom ciklusu projekta. To se ostvaruje kroz kontinuirano praćenje napretka izvedbe projekta u stvarnom vremenu te istovremenim stvaranjem baze podataka za drugostupanjsko učenje na budućim projektima. Kroz praćenje projekta u stvarnom vremenu, u analiziranim istraživanjima zamijećeni su napredci u osiguravanju sigurnosti na gradilištu u kontekstu sigurnosti radnika te osiguravanju ugovorene razine kvalitete konstrukcijskih elemenata te samim time građevine u cijelosti. U radu je prikazan i konkretan primjer stvaranja digitalnog blizanca na temelju kojega se može zaključiti da takav proces može imati povoljan utjecaj na fazu građenja u životnom ciklusu projekta. Može koristiti inženjeru gradilišta za bolju komunikaciju s menadžmentom te omogućava pravovremene analize i poduzimanje korektivnih mjera zbog dostupnosti podataka u stvarnom vremenu.

### Literatura

- [1] Petrillo, A., De Felice, F., Cioffi, R., Zomparelli, F.: Fourth industrial revolution: Current practices, challenges, and opportunities, *Digital transformation in smart manufacturing*, 2018, (1-20), <https://doi.org/10.5772/intechopen.72304>
- [2] Lee, J., Bagheri, B., Kao, H-A.: A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems, *Manufacturing letters*, vol. 3, 2015, (18-23), <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- [3] Sawhney, A., Riley, M., Irizarry, J., Riley, M.: *Construction 4.0*, prvo izdanje, Taylor & Francis, 2020, <https://doi.org/10.1201/9780429398100>
- [4] Zhou, K., Liu, T., Zhou, L.: Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges, 2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD), Zhangjiajie, Kina, IEEE 2015
- [5] Anumba, C.J., Akanmu, A., Yuan, X., Kan, C.: Cyber—physical systems development for construction applications, *Frontiers of Engineering Management*, vol. 8, 2021, (72-87), <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0130-4>
- [6] Dillon, T.S., Zhuge, H., Wu, C., Singh, J., Chang, E.: Web-of-things framework for cyber—physical systems, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 23, 2011, (905-23), <https://doi.org/10.1002/cpe.1629>
- [7] Chen, N., Xiao, C., Pu, F., Wang, X., Wang, C., Wang, Z., et al.: Cyber-physical geographical information service-enabled control of diverse in-situ sensors, *Sensors*, vol. 15, 2015, (2565-92), <https://doi.org/10.3390/s150202565>.
- [8] What is a Digital Twin?, poveznica (<https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>), pristupljeno: 22.06.2022.
- [9] Akanmu, A.A., Anumba, C.J., Ogunseiju, O.O.: Towards next generation cyber-physical systems and digital twins for construction, *J Inf Technol Constr*, vol. 26, 2021, (505-25), <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.027>
- [10] Kim, S., Irizarry, J.: Exploratory study on factors influencing UAS performance on highway construction projects: as the case of safety monitoring systems, *Conference on Autonomous and*

- Robotic Construction of Infrastructure, White, D., Alhasan, A., Vennapusa, P., Ames, Iowa, SAD, Iowa State University, (132-148), 2015
- [11] Yuan, X., Anumba, C.J.: Cyber-physical systems for temporary structures monitoring, *Cyber-physical systems in the built environment*, vol., 2020, (107-38), <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.005>
- [12] Correa, F.R.: Cyber-physical systems for construction industry, *Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, Williams, K., Sankt Petersburg, Rusija, IEEE, 2018
- [13] You, Z., Feng, L.: Integration of industry 4.0 related technologies in construction industry: a framework of cyber-physical system, *IEEE Access*, vol. 8, 2020, (122908-22), <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007206>
- [14] Hou, L., Wu, S., Zhang, G., Tan, Y., Wang, X.: Literature review of digital twins applications in construction workforce safety, *Applied Sciences*, vol. 11, 2020, (339), <https://doi.org/10.3390/app11010339>
- [15] Kan, C., Anumba, C.: Digital twins as the next phase of cyber-physical systems in construction, *Computing in Civil Engineering 2019: Data, Sensing, and Analytics*, Cho, Y., Leite, F., Behzadan, A., Wang, C., Atlanta, Georgia, SAD, American Society of Civil Engineers (ASCE), (256-64), 2019
- [16] Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., Rezgui, Y.: Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research, *Automation in Construction*, vol. 114, 2020, (103179), <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- [17] Rausch, C., Sanchez, B., Esfahani, M.E., Haas, C.: Computational algorithms for digital twin support in construction, *ASCE Construction Research Congress (CRC)*, Asmar, M.E., Grau, D., Tang, P., Tempe, Arizona, SAD, American Society of Civil Engineers (ASCE), (1-10), 2020





**MJERENJE NABORANOSTI TRAČNICA NA  
TRAMVAJSKOM KOLOSIJEKU**

**Measurements of rail corrugation on tramway  
track**

**Krešimir Burnać<sup>1</sup>, Ivo Haladin<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kburnac@grad.hr



## Sažetak

Naboranost tračnica je nepravilnost koja se često pojavljuje na voznoj površini glave tračnice i može uzrokovati povišene razine vibracija i buke te ubranu degradaciju kolosiječne konstrukcije. U radu su opisane mogućnosti mjerenja ravnosti tračnice indirektnim i direktnim postupkom te je dodatno opisano ispitivanje ravnosti direktnim postupkom na zagrebačkoj tramvajskoj mreži. Na nekoliko lokacija u Zagrebu na kolosijeku je izmjerena hrapavost vozne površine glave tračnice nakon čega su njihove vrijednosti analizirane s obzirom na starost pojedinih dijelova trase i vrstu horizontalnih elemenata trase. Pokazalo se da se naboranost pojavljuje češće u krivinama nego u pravcima i da su valne duljine i amplitude naboranosti veće na tračnicama koje su dulje vrijeme u eksploataciji. Zaključci rada su u skladu s očekivanjima, ali kao dodatni korak prema automatizaciji analize podataka o naboranosti testira se model mjerenja indirektno ravnosti u svrhu primjene na cijeloj mreži koristeći monitoring na vozilima.

*Ključne riječi: tramvaj, kolosijek, naboranost tračnica, mjerenje, nepravilnosti tračnica*

## Abstract

Rail corrugation is an irregularity that often occurs on a railhead running surface and can cause an increase in the noise and vibrations levels as well as faster track deterioration. The possibilities of direct and indirect rail corrugation measurements are described in this paper as well as direct rail corrugation measurement that was carried out on a tramway track network in the city of Zagreb. Rail roughness was measured on several locations on the tramway track and the values were analysed in respect to the exploitation period of the tramway sections and the type of horizontal alignment. Analysis has shown that rail corrugation occurs more often in the curves than in the straight track and that the wavelength and amplitude of rail corrugation are higher on tramway track that has longer exploitation period. Conclusions of this paper are as expected, but as a next step towards automatization of the rail corrugation data analysis, indirect measurements model is tested with a purpose of application on the whole tram track network using tramway vehicle monitoring.

*Keywords: tramway vehicle, track, rail corrugation, measurement, rail irregularities*

## 1. Uvod

Naboranost tračnice je nepravilnost koja može uzrokovati povišene razine buke, vibracija i ubranu degradaciju dijelova kolosijeka i tračničkih vozila [1]. Detekcija ovakvih nepravilnosti ljudskim okom vrlo je teška, osobito u ranim fazama razvoja, te iziskuje sofisticirane mjerne metode i zaposjedanje pruge. Nadalje, brušenje kao metoda za uklanjanje naboranosti ne sprječava ponovno pojavljivanje naboranosti tračnice nakon nekog vremena eksploatacije. Iz tog razloga je potrebno promatrati razvoj naboranosti tračnica u kontroliranim uvjetima i definirati parametre koji utječu na njezino povećanje [2]. Naboranost tračnica može se mjeriti direktno (pomoću ručnih uređaja, direktno na kolosijeku) ili indirektno (pomoću tračničkog vozila opremljenog inercijalnim mjernim sustavom) [3]. U radu [4] autori opisuju razvoj mjernih kolica za kontinuirano mjerenje hrapavosti površine (direktno mjerenje) pomoću kojih su skupljani podaci vezani uz mehanizme pojave naboranosti na tračnicama. Kao krajnji rezultat analize, uz pomoć rezultata mjerenja naboranosti mjernim kolicima u kombinaciji sa prijenosnim uređajem za monitoring naboranosti (koji je instaliran na tračničkom vozilu), razvijena je efikasna metoda upravljanja brušenja s ciljem optimizacije i smanjenja troškova.

Korištenje tračničkih vozila sa inercijalnim mjernim sustavom (akcelerometrima) otvara niz mogućnosti detektiranja nepravilnosti i oštećenja na kolosijeku kao što su puknuća tračnica, loše izvedeni zavari, izolirani spojevi i naboranost tračnica [5]. Matematički model koji je izrađen u sklopu studije [1], predviđa porast naboranosti i optimizaciju rasporeda brušenja tračnica, samim time veću efikasnost metode te kao rezultat predstavlja značajno smanjenje troškova održavanja kolosijeka. Studija je potvrdila da se funkcije krivulje ponašanja (rast) naboranosti u vremenu mogu modelirati pomoću rezultata mjerenja ravnosti površine kroz duži period. Vibracije i dinamičke sile koje nastaju kontaktom kotača i tračnice sadrže najvažnije informacije koje se koriste za ocjenu stanja kolosijeka i predviđanje ponašanja oštećenja i nepravilnosti na kolosijeku u svrhu osiguravanja visokog stupnja učinkovitosti takvih metoda.

Uzimajući u obzir saznanja o kontaktu kotača i tračnice, mogu se koristiti dva načina indirektnog mjerenja vibracija na kolosijeku: montiranjem senzora na okretno postolje za monitoring tračnice i/ili postavljanjem senzora na tračnicu u svrhu monitoringa vagona. U sklopu MaVico projekta [6] razvijen je prototip sustava za nadzor naboranosti tračnice sa ciljem prevencije posljedica koje naboranost tračnica ima na kolosijek i opremu

vagona. Na temelju mjerenja akceleracija na okretnom postolju koji služe za određivanje stanja naboranosti tračnice napravljeni su algoritmi koji su pokazali zadovoljavajuće rezultate mjerenja ravnosti tračnice indirektnom metodom u usporedbi sa klasičnom, direktnom metodom mjerenja pomoću mjernih kolica. Opisan sustav za indirektno mjerenje hrapavosti tračnice može izmjeriti više od 100 km željezničke pruge u jednom danu dok bi direktnoj metodi za mjerenje iste dionice trebalo nekoliko tjedana [7]. Cilj rada je predstaviti mjerenje podataka o naboranosti vozne površine glave tračnice direktnom metodom sa svrhom automatizacije analize podataka izmjerenih naboranosti u budućim istraživanjima koristeći indirektnu metodu mjerenja ravnosti i mogućnosti primjene iste na cijeloj mreži koristeći monitoring na tramvajskim vozilima.

#### 4. Mjerenje ravnosti tračnica na tramvajskom kolosijeku Zagreb

Prvi dio istraživanja sastoji se od direktnog (ručnog) mjerenja ravnosti vozne površine tračnice na zagrebačkoj mreži tramvajskih kolosijeka. Ravnost vozne površine tračnice mjerena je prema normi HRN EN 15610 „Željeznički sustav – Akustika – Mjerenje hrapavosti tračnica i kotača u vezi stvaranja buke“ [8], pomoću uređaja za mjerenje ravnosti površine tračnica (slika 1d) koji omogućava mjerenja nabora valnih duljina od 1 cm do 40 cm. Mjerenja ravnosti vozne površine tračnice provedena su na lokaciji Horvaćanski zavoj (lokacija L1, slika 1a), Horvaćanska – Hrgovići (lokacija L2, slika 1b) i na raskrižju Horvaćanska – Hrvatskog Sokola (lokacija L3, slika 1c), na oba kolosijeka sa ukupno 54 mjerna mjesta (tablica 1).



**Slika 1.** Lokacije mjerenja ravnosti vozne površine tračnica (a,b,c) i prikaz rada uređaja za mjerenje ravnosti tračnica (d)

Navedene lokacije odabrane su jer su na njima primijećene naboranosti prilikom vizualne inspekcije. Nastavno na vizualnu inspekciju, detektirane su povišene razine vibracija i

buke u neposrednoj blizini tramvajskog kolosijeka. Dodatni kriteriji za odabir lokacije bili su različita starost tračnice za promatrane lokacije, različiti sustavi pričvršćenja i geometrijski elementi kolosijeka (pravac i krivina) kako bi se obuhvatio što veći broj parametara kolosijeka i tračnica koji se može analizirati. Na svakoj od lokacija (L1, L2 i L3) postoje mjerna mjesta i u pravcu i horizontalnoj krivini što će dodatno pridonijeti analizi vezanoj uz geometrijske elemente kolosijeka. Nakon mjerenja je napravljena analiza rezultata s ciljem kvalitativne ocjene ravnosti vozne površine tračnice i usporedbe ravnosti tračnica obzirom na različite parametre kolosijeka.

**Tablica 1.** Pregled mjernih lokacija, mjernih mjesta i njihovih obilježja

Lokacija	Godina rekonstrukcije (eksploatacije)	Sustav pričvršćenja	Mjerno mjesto	Radijus	Tračnica
L1	2017 (4)	PPE	MM 1	pravac	-
			MM 4	348 m	vanjska
			MM 7	348 m	unutarnja
L2	2004 (17)	DEPP	MM 2	pravac	-
			MM 5	1025 m	vanjska
			MM 6	pravac	-
			MM 8	1025 m	unutarnja
L3	2000 (21)	DEPP	MM 3	pravac	-

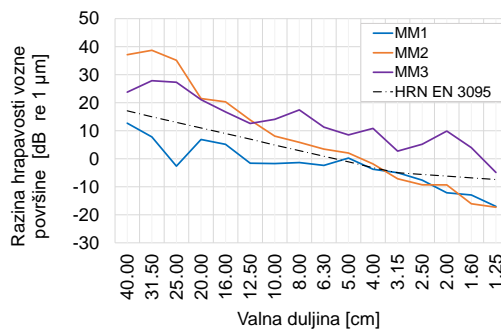
## 5. Analiza rezultata

Analizirane su izmjerene vrijednosti ravnosti vozne površine tračnice čije su amplitude (dB re 1 $\mu$ m) i valne duljine (cm) obrađene pomoću Fourier-ovih transformacija i prikazane u tercnim frekvencijskim pojasevima valnih duljina od 1.25 cm do 40 cm, sukladno normi [8]. Pojava i svojstva naboranosti tračnice su analizirani ovisno o parametrima koji utječu na naboranost. Ti parametri obuhvaćaju horizontalni položaj kolosijeka (u pravcu ili krivini), veličinu polumjera krivine i položaj tračnice obzirom na središnju os (vanjska ili unutarnja tračnica). Na dijagramima u nastavku prikazana je uz analizirane ravnosti površine tračnice i granična krivulja prema normi HRN ISO 3095 „Akustika – Oprema za željeznice – Mjerenje buke koju proizvode željeznička vozila“. Prema navedenoj normi, vrijednosti ravnosti površine tračnice koje se nalaze ispod

postavljene granice neće imati utjecaj na povećanje buke i vibracija, dok će vrijednosti iznad granice imati utjecaj na buku i vibracije od željezničkih vozila. Na apscisi dijagrama nalaze se valne duljine naboranosti iskazane u centimetrima dok se na ordinati nalaze vrijednosti amplituda iskazane u dB (referentna vrijednost  $1\mu\text{m}$ ). Osnovna usporedba ravnosti napravljena je za tri različite dionice (L1, L2, L3) analizirajući vrijeme eksploatacije kolosijeka.

### Naboranost i vrijeme eksploatacije

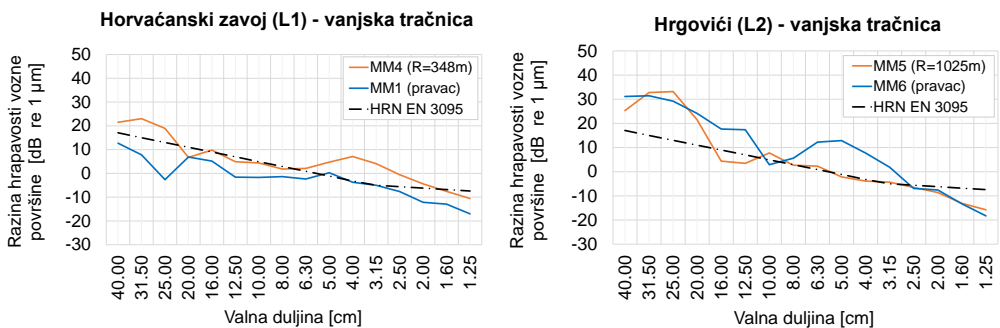
Analizom se pokušava utvrditi nastanak i razvoj naboranosti ovisno o vremenu eksploatacije kolosijeka. Valja napomenuti da se sve lokacije nalaze na istoj tramvajskoj trasi, pa je obujam prometa proporcionalan vremenu eksploatacije. Na slici 2 prikazana je ravnost površine tračnice u pravcu na lokaciji L1 (MM1), L2 (MM2) te L3 (MM3). Na dionici koja je najduže u eksploataciji (L3, MM3) pojavljuje se veći broj izraženih obrazaca naboranosti pri valnim duljinama  $\lambda = 2\text{cm}$ ,  $\lambda = 4\text{ cm}$  i  $\lambda = 8\text{ cm}$ . Na lokaciji L2 (MM2) naboranosti su dominantne u području od 25 do 40 cm (najveća amplituda  $\lambda = 31,50\text{ cm}$ ,  $a = 38,7\text{ dB}$ ), dok se na lokaciji L1 (L1, MM1) s obzirom na kratko vrijeme eksploatacije nisu još pojavili nabori vozne površine glave tračnice dominantnih valnih duljina.



**Slika 2.** Usporedba ravnosti vozne površine prema starosti kolosijeka

### Naboranost i horizontalni elementi geometrije kolosijeka

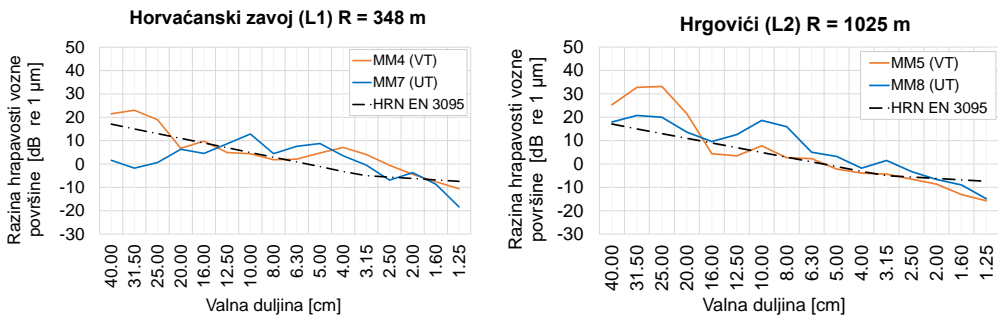
Analizirane su ravnosti vozne površine vanjske tračnice za krivine različitih polumjera  $R=348$  m (L1, MM 4) i  $R=1025$  m (L2, MM 5) (slika 3) u odnosu na ravnost tračnice u pravcu na istim mjernim lokacijama (L1, MM1 i L2, MM6). Ovakvom analizom moguće je uočiti da je značajnija razlika naboranosti prisutna kod krivina manjeg polumjera u odnosu na naboranost u pravcu. Na vanjskoj tračnici kolosijeka sa manjim polumjerom (MM 4,  $R = 348$  m), detektirano je nekoliko dominantnih valnih duljina naboranosti ( $\lambda = 25$  cm,  $\lambda = 16$  cm,  $\lambda = 4$  cm), dok se kod kolosijeka većeg polumjera (MM 5,  $R = 1025$  m) na tračnici pojavljuju isključivo dominantne valne duljine naboranosti oko 25 cm s amplitudom  $a = 33.2$  dB. Kod kolosijeka u pravcu gotovo nijedna valna duljina nije dominantna na lokaciji L1 (MM 1), no na lokaciji L2 (MM6) vidljiv je razvoj naboranosti sličan onome u krivini velikog polumjera (MM5) s dodatno naglašenom valnom duljinom od 5 cm.



**Slika 3.** Usporedba ravnosti vozne površine vanjske tračnice kolosijeka u krivini i pravcu na lokaciji L1 (a) i L2 (b)

Zanimljivo je promotriti i razliku naboranosti vanjske i unutarnje tračnice na mjernim mjestima u krivini zbog različitog djelovanja opterećenja od vozila uslijed djelovanja centrifugalne sile koja je prisutna pri kružnom gibanju. Na slici 4. prikazane su ravnosti vozne površine unutarnje i vanjske tračnice na kolosijecima sa različitim polumjerima krivina ( $R = 348$  m i  $R = 1025$  m). Neovisno o veličini polumjera, na vanjskoj tračnici (MM 4, MM 5) dominiraju veće valne duljine naboranosti u frekventnim pojasevima 31.5 cm ( $a = 23$  dB) i 25 cm ( $a = 33.2$  dB), dok su na unutarnjoj tračnici (MM 7, MM 8) dominantne kraće valne duljine naboranosti u rasponu od 5 do 10 cm s amplitudama  $a = 18.7$  dB (za  $R = 1025$  m) i  $a = 12.7$  dB (za  $R = 348$  m). Veće amplitude javljaju se kod radijusa većeg

polumjera jer je kolosijek na lokaciji L2 (MM 5, MM 8) dulje vrijeme u eksploataciji od lokacije L1 (MM 4, MM 7) i parametar vremena eksploatacije više utječe na veličinu amplitude od veličine polumjera.



**Slika 4.** Ravnost vozne površine unutarne i vanjske tračnice u krivinama različitih polumjera na lokaciji L1 (a) i L2 (b)

## 5.1. Buduća istraživanja

Drugi dio istraživanja podrazumijeva pretvorbu vrijednosti valnih duljina (izmjenjenih direktnim mjerenjem ravnosti glave tračnice na kolosijeku) u frekvencijsku domenu kako bi vrijednosti bile usporedive sa signalom vibracija snimanih prilikom prolaska tramvajskog vozila po kolosijeku (indirektna metoda). Konačno, usporedba direktne i indirektna metode mjerenja predstavljala bi bazu za daljnja istraživanja i izradu modela procjene razvijanja naboranosti (s obzirom na amplitudu i valne duljine nabora) koji bi služio za razvoj optimalnog rasporeda održavanja (brušenja) kolosijeka. Dodatno, model bi se temeljio na indirektnim mjerenjima pomoću akcelerometara instaliranih na standardnom tramvajskom vozilu što bi predstavljalo veliko unapređenje i pojednostavljenje (nema potrebe za ručnim mjerenjem) i dodatna financijska rasterećenja pri održavanju tramvajske mreže kao i smanjenje razina buke i vibracija.

## 6. Zaključak

Promatrajući ovisnost naboranosti o vremenu eksploatacije, zaključeno je da će se količina dominantnih valnih duljina naboranosti povećavati na kolosijecima sa povećanjem vremena eksploatacije. Kod kolosijeka u krivini moguće je uočiti da je veličina radijusa obrnuto proporcionalna razvoju naboranosti te da je pri većim


radijusima razvoj naboranosti sličan onom zabilježenom u pravcu. Naboranosti vanjske tračnice su dominantne pri većim valnim duljinama od unutarne tračnice, a dominantne valne duljine naboranosti ne ovise o polumjeru krivine. Rezultati direktnih mjerenja provedenih u Zagrebu na 3 lokacije koji su proračunati u skladu s normom EN 15610 [8] poslužit će kao osnova za detekciju naboranosti indirektnim mjerenjem i daljnje istraživanje korelacije rezultata indirektnih i direktnih mjerenja naboranosti tračnica.

## Literatura

- [1] Tanaka, H., Miwa, M.: Modeling the development of rail corrugation to schedule a more economical rail grinding, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit 2020,234,370–80, <https://doi.org/10.1177/0954409719894833>.
- [2] Ng, A.K., bin Alias, Z., Chassin, J.F., Yebra, J.H.: Managing rail corrugation through modelling, simulation, and instrumentation technologies. 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation, ICIRT 2016, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016, 307–14, <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2016.7588748>.
- [3] Tanaka, H., Shimizu, A., Sano, K.: Development and verification of monitoring tools for realizing effective maintenance of rail corrugation, 6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014), 2014.
- [4] Tanaka, H., Shimizu, A.: Practical Application of Portable Trolley for the Continuous Measurement of Rail Surface Roughness for Rail Corrugation Maintenance. vol. 57, 2016.
- [5] Molodova, M., Li, Z., Dollevoet, R.: Axle box acceleration: Measurement and simulation for detection of short track defects, Wear, 2011, 271, 349–56, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.003>.
- [6] MaVico Project, Vibratec group, <https://www.vibratecgroup.com/en/blog/news/connected-maintenance-using-vibration-measurements/>, accessed: 29.08.2022.
- [7] Augez, R., Cloix, A., Clerc, C.: Autonomous Embedded Vibroacoustic Measurements: an efficient tool for railway monitoring
- [8] HRN EN 15610, Željeznički sustav – Akustika – Mjerenje hrapavosti tračnica i kotača u vezi stvaranja buke, 2019







# UTJECAJ VRSTE I KOLIČINE SUPERPLASTIFIKATORA NA SVOJSTVA BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM

## Influence of superplasticizer type and dosage on properties of concrete with recycled rubber

**Robert Bušić<sup>1</sup>, Ivana Miličević<sup>1</sup>, Zoran Lukić<sup>2</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, Zavod za materijale i konstrukcije, rbusic@gfos.hr

(2) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, zoranlukic84@gmail.com

## Sažetak

Utjecaj superplastifikatora očituje se u smanjenju vodocementnog omjera uz održavanje konzistencije betona, čime se doprinosi povećanju tlačne čvrstoće i poboljšanju svojstava trajnosti. Stoga je u ovome radu istražen učinak dvije vrste superplastifikatora, označenih A1 i A2 (0, 0,2 i 0,4 % mase cementa), na svojstva običnog betona i betona s gumom u svježem i očvrnulom stanju. Konzistencija betona slijeganjem i rasprostiranjem ispitana je odmah po završetku miješanja betona te 90 minuta nakon završetka miješanja betona, a svojstva betona u očvrnulom stanju interpretirana su pomoću vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Rezultati ispitivanja pokazuju da obje vrste superplastifikatora imaju pozitivan utjecaj na svojstva betona s recikliranom gumom u svježem i očvrnulom stanju, odnosno da su konzistencija i tlačna čvrstoća betona povećani u odnosu na referentnu betonsku mješavinu.

*Ključne riječi: beton, reciklirana guma, konzistencija, tlačna čvrstoća*

## Abstract

Influence of superplasticizers can be seen in the reduction of water-cement ratio while maintaining concrete consistency, thus contributing to the increase of compressive strength and improvement of durability properties. Therefore, the effect of two types of superplasticizers, labeled A1 and A2 (0, 0.2, and 0.4 % of cement mass), on the fresh and hardened properties of traditional and rubberized concrete was investigated. The consistency of the concrete was examined at 0 and 90 minutes after mixing, and the hardened properties were evaluated by compressive strength and modulus of elasticity. The test results showed that both types of superplasticizers had a positive influence on the fresh and hardened properties of concrete with recycled rubber, i.e. increase in concrete consistency and compressive strength.

*Keywords: concrete, crumb rubber, consistency, compressive strength*

## 1. Uvod

Guma kao bio-nerazgradivi materijal, ima poprilično dugačak životni vijek, a jedan od načina ponovnog korištenja otpadne gume je dodavanje iste u beton kao zamjena za prirodni agregat. Bitne karakteristike betona u svježem i očvrslom stanju se mijenjaju dodavanjem gume u beton. Pregledom literature je ustanovljeno da se konzistencija betona, kao i njegova tlačna čvrstoća, smanjuju s povećanjem udjela gume u betonu [1]–[4]. Superplastifikatori su kemijski dodatci koji se u betonskoj industriji koriste više od 50 godina. Njihov se utjecaj očituje u smanjenju vodocementnog omjera uz održavanje konzistencije betona, te se na ovaj način može doprinijeti poboljšanoj mehaničkoj svojstava i svojstava trajnosti betona. Stoga se u ovom radu pristupilo istraživanju utjecaja vrste i količine kemijskih dodataka na svojstva betona s recikliranom gumom. Do danas su provedena brojna istraživanja utjecaja količine i vrste kemijskih dodataka na svojstva običnog betona u svježem i očvrslom stanju [5]–[10], no vrlo mali broj istraživanja se bavio utjecajem količine i vrste kemijskih dodataka na svojstva betona s recikliranom gumom u svježem i očvrslom stanju [11], [12]. Cilj ovoga istraživanja je utvrditi utjecaj vrste i količine dvaju komercijalno dostupnih superplastifikatora na svojstva betona s gumom u svježem i očvrslom stanju, te definirati optimalnu količinu superplastifikatora pri kojoj je moguće ostvariti optimalnu konzistenciju i zadovoljavajuću tlačnu čvrstoću betona, kao dvije najbitnije karakteristike betona u svježem i očvrslom stanju.

## 2. Eksperimentalni dio

### 2.1. Materijali i metode ispitivanja

#### 2.1.1. Materijali

Cement CEM I 42,5 N iz tvornice cementa u Našicama korišten je kao vezivo. Cement je u skladu s normom HRN EN 197-1:2012 [13], specifične težine  $3,15 \text{ g/cm}^3$  i finoće mliva po Blaineu od  $4216 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Silicijska prašina (SLF) iz mjesta Pocking (Njemačka) korištena je kao mineralni dodatak betonu. Silicijska prašina je u skladu s normom HRN EN 13263-1:2009 [14], specifične težine  $2,19 \text{ g/cm}^3$  i specifične površine od  $20,5 \text{ m}^2/\text{g}$ . Korištena je voda iz javnog sustava vodoopskrbe grada Osijeka, koja je u skladu s normom HRN EN

1008:2002 [15]. Kao sitni (FA) i krupni agregat (CA) korišten je drobljeni kamen i prirodni pijesak nominalne veličine zrna od 8-16 mm, 4-8 mm, 0-4 mm i 0-2 mm sa specifičnom težinom od 2,88 g/cm<sup>3</sup>, 2,88 g/cm<sup>3</sup>, 2,79 g/cm<sup>3</sup> i 2,58 g/cm<sup>3</sup>.

Reciklirana guma (0,5 – 3,5 mm) dobivena mehaničkim mljevenjem lokalnih otpadnih automobilskih guma, specifične težine od 1,05 g/cm<sup>3</sup>, korištena je kao zamjena sitnom agregatu u 10 %-tnoj vrijednosti njegovog volumena (frakcija 0-4 mm). Korištene su dvije vrste superplastifikatora Energy FM 500 (A1) i Energy FM 500 NX (A2), a karakteristike superplastifikatora i njihova međusobna usporedba prikazane su u Tablici 1.

**Tablica 1.** Karakteristike korištenih superplastifikatora

Plastificiranje	A1	1	2	3	4	5
	A2	1	2	3	4	5
Držanje konzistencije	A1	1	2	3	4	5
	A2	1	2	3	4	5
Rane čvrstoće	A1	1	2	3	4	5
	A2	1	2	3	4	5

### 2.1.2. Sastav betonskih mješavina i metode ispitivanja

Sastav mješavina betona s gumom i bez gume prikazan je u Tablici 2. Vodovezivni omjer je za sve mješavine bio jednak ( $v/c=0,50$ ) a prilikom korištenja silicijske prašine (SLF) usvojen je k-koncept sukladno normi HRN EN 206 [16]. Superplastifikatori A1 i A2 korišteni su u postotku od 0 %; 0,2 % i 0,4 % mase cementa. Postotni udio pojedine frakcije agregata u ukupnom volumenu agregata kod referentne mješavine betona iznosio je 20 %, 35 %, 20 % i 25% za frakcije agregata 0-2 mm, 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm.

**Tablica 2.** Sastavi betonskih mješavina

Redni broj	Oznaka betonske mješavine	CEM	SLF	CA	FA	CR	SP(%)
1	R0	350	0	1044,14	906,67	0	0
2	R0-0.2-A1	350	0	1043,17	905,83	0	0,2
3	R0-0.4-A1	350	0	1042,20	904,99	0	0,4
4	R0-0.2-A2	350	0	1043,17	905,83	0	0,2
5	R10	427,50	22,5	732,49	782,29	63,38	0,0
6	R10-0.2-A1	427,50	22,5	731,53	781,26	63,30	0,2
7	R10-0.4-A1	427,50	22,5	730,57	780,24	63,21	0,4
8	R10-0.2-A2	427,50	22,5	731,53	781,26	63,30	0,2

LEGENDA: CEM – cement, SLF – silicijska prašina, FA – sitni agregat, CA – krupni agregat, CR – reciklirana guma, SP – superplastifikator

U svježem stanju ispitana je konzistencija slijeganjem prema normi HRN EN 12350-2:2019 [17] i konzistencija rasprostiranjem prema normi HRN EN 12350-5:2019 [18] (Slika 1). U očvrslom stanju ispitana je tlačna čvrstoća i modul elastičnosti pri starosti uzoraka od 28 dana. Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti ispitani su na uzorcima valjaka (3 uzorka) dimenzija 150 mm × 300 mm sukladno normama HRN EN 12390-3:2019 [19] i HRN EN 12390-13:2013 [20] (Slika 2).



**Slika 1.** Ispitivanje betona u svježem stanju (konzistencija slijeganjem)



**Slika 2.** Ispitivanje betona u očvrslom stanju (tlačna čvrstoća i modul elastičnosti)

## 2.2. Eksperimentalni rezultati i diskusija

### 2.2.1. Utjecaj vrste i količine superplastifikatora na svojstva betona s gumom u svježem stanju

U Tablici 3. prikazani su rezultati ispitivanja betona u svježem stanju. Konzistencija betona ispitana je odmah po završetku miješanja betona i 90 minuta nakon završetka miješanja betona. Očekivano, kod svih ispitanih mješavina betona konzistencija je smanjena 90 minuta nakon miješanja betona. Nadalje, kod mješavina, povećanjem količine superplastifikatora, konzistencija betona je također povećana. Potrebno je istaknuti kako se konzistencija betona kod mješavina R10-0.2-A1, R10-0.4-A1 i R10-0.2-A2 odmah po završetku miješanja betona nije mogla ispitati. Ipak, kod navedenih mješavina uočena je pojava dobre konzistencije nakon 90 minuta, što se u slučaju transporta betona od

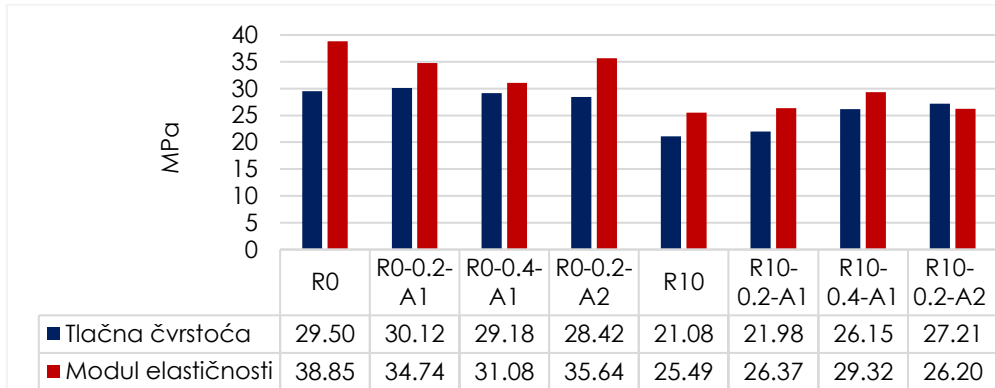
betonare do gradilišta može smatrati pozitivnom pojavom. Ukoliko se uspoređuje utjecaj različite vrste superplastifikatora na svojstva betona s gumom u svježem stanju, može se zaključiti da se s obje vrste superplastifikatora mogu ostvariti poželjni razredi konzistencije slijeganjem (S4 i S5) i rasprostiranjem (F4, F5 i F6) 90 minuta nakon završetka miješanja betona.

**Tablica 3.** Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju

Redni broj	Oznaka betonske mješavine	Konzistencija slijeganjem (mm)		Konzistencija rasprostiranjem (mm)	
		0 min	90 min	0 min	90 min
1	R0	120	25	480	350
2	R0-0.2-A1	225	55	600	420
3	R0-0.4-A1	260	160	-	480
4	R0-0.2-A2	170	25	505	360
5	R10	195	160	522,5	415
6	R10-0.2-A1	-	210	-	467,5
7	R10-0.4-A1	-	290	-	700
8	R10-0.2-A2	-	240	-	580

### 2.2.2. Utjecaj vrste i količine superplastifikatora na svojstva betona s gumom u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja betona u očvrslom stanju prikazani su na Slici 3. Vrijednosti tlačnih čvrstoća betona bez gume su ujednačeniji te poprimaju vrijednosti oko  $30 \pm 1,5$  MPa, dok su rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća betona sa gumom nešto raspršeniji i poprimaju vrijednosti od 21 do 27 MPa. Može se zaključiti da superplastifikator nema utjecaja na vrijednost tlačne čvrstoće betona bez gume, dok pozitivno utječe na vrijednost tlačnih čvrstoća kod betona s gumom. Od ispitanih postotnih udjela superplastifikatora (0 %; 0,2 % i 0,4 %) pozitivan utjecaj na vrijednost tlačne čvrstoće je kod superplastifikatora A1 vidljiv pri postotku zamjene od 0,4 % mase cementa (povećanje za 24%), dok je kod superplastifikatora A2 pozitivan utjecaj vidljiv pri postotku zamjene od 0,2 % (povećanje za 29%). Objašnjenje je moguće pronaći u jednolikoj raspodjeli gume po visini uzorka, što je omogućeno dodavanjem optimalne količine superplastifikatora u betonsku mješavinu, dovodeći samim time i do povoljnijih rezultata ispitivanja. Što se tiče modula elastičnosti, rezultati ispitivanja su veći kod betona bez gume, što može biti objašnjeno s većom deformabilnošću gume u odnosu na prirodni agregat, što doprinosi smanjenju vrijednosti modula elastičnosti betona.



Slika 3. Rezultati ispitivanja betona u očvrslulom stanju

### 3. Zaključak

Poboljšanje svojstava građevinskih materijala, s naglaskom na njihovu ekološku prihvatljivost i održivost, jedan je od glavnih ulaznih parametara prilikom istraživanja novih materijala u građevinarstvu. Kemijski dodatci doprinose povećanju mehaničkih karakteristika betona i poboljšanju svojstava trajnosti betona. Stoga je u ovome radu istražena upotreba različitih vrsta (A1 i A2) i količina (0 %; 0,2 % i 0,4 %) superplastifikatora na svojstva betona s recikliranom gumom u svježem i očvrslulom stanju. Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja 10 % volumena sitnog agregata je zamijenjeno s recikliranom gumom. Na temelju rezultata eksperimentalnog ispitivanja zaključuje se da ispitani superplastifikatori imaju pozitivan utjecaj na svojstva betona s gumom u svježem i očvrslulom stanju. Konzistencija betona 90 minuta nakon završetka miješanja betona je održana na poželjnim razredima konzistencije slijeganjem (S4 i S5) i rasprostiranjem (F4, F5 i F6), dok je tlačna čvrstoća betona s gumom pri količini superplastifikatora od 0,2 % i 0,4 % mase cementa povećana za 24 % i 29 % u odnosu na tlačnu čvrstoću betona s gumom bez superplastifikatora. Pozitivan utjecaj korištenja ispitanih vrsta i količina superplastifikatora kod betona s recikliranom gumom je dokazan, a predlaže se provedba dodatnih eksperimentalnih ispitivanja utjecaja manjeg vodocementnog omjera, druge vrste cementa i veće količine superplastifikatora na svojstva betona s recikliranom gumom u svježem i očvrslulom stanju.



## Literatura

- [1] T. Uygunoğlu and I. B. Topçu, "The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1141–1150, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027.
- [2] M. K. Ismail and A. A. A. Hassan, "Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber," *J. Clean. Prod.*, vol. 125, pp. 282–295, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.044.
- [3] F. Aslani, G. Ma, D. L. Yim Wan, and V. X. Tran Le, "Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 1835–1847, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.003.
- [4] R. Bušić, M. Benšić, I. Miličević, and K. Strukar, "Prediction Models for the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Rubber and Silica Fume," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1821, Apr. 2020, doi: 10.3390/ma13081821.
- [5] M. H. Abdullah, E. T. Dawood, and N. K. Ismael, "Effects Superplasticizer Type and Dosage on The Properties of Reactive Powder Concrete," *J. Civ. Eng. Inter Discip.*, vol. 1, no. 1, pp. 41–45, 2020, doi: 10.47890/jceid/2020/etdawood/12045785.
- [6] S. Alsadey, "Effect of Superplasticizer on Fresh and Hardened Properties of Concrete," *J. Agric. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 70–74, 2015.
- [7] M. Benaicha, A. Hafidi Alaoui, O. Jalbaud, and Y. Burtshell, "Dosage effect of superplasticizer on self-compacting concrete: Correlation between rheology and strength," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 2063–2069, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.01.015.
- [8] I. Papayianni, G. Tsohos, N. Oikonomou, and P. Mavria, "Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 217–222, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.010.
- [9] T. U. Mohammed *et al.*, "Influence of Chemical Admixtures on Fresh and Hardened Properties of Prolonged Mixed Concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2017, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1155/2017/9187627.
- [10] S. Chandra and J. Björnström, "Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars—Part I," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 10, pp. 1605–1611, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00839-6.
- [11] M. M. Al-tayeb and H. Hamouda, "Effect of Superplasticizer on Workability of Concrete Containing Crumb Rubber," *Civ. Environ. Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 35–44, 2015.
- [12] M. M. Al-Tayeb, I. El-Daoor, N. Abu-Shaaban, and H. Hamouda, "Optimum Superplasticizer Added To Rubberized Concrete Prepare By Adding Powder Rubber As Cement Replacement," *J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 7, pp. 3159–3199, 2015, [Online]. Available: [www.jmest.org](http://www.jmest.org).
- [13] "EN 197-1:2012 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements," 2012.
- [14] "EN 13263-1:2009 Silica fume for concrete - Part 1: Definitions, requirements and conformity criteria," 2009.
- [15] "EN 1008:2002 Mixing water for concrete – Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete," 2002.
- [16] "EN 206:2013+A2:2021 Concrete --Specification, performance, production and conformity."
- [17] "EN 12350-2:2019 Testing fresh concrete -- Part 2: Slump-test," 2019.
- [18] "EN 12350-5:2019 Testing fresh concrete -- Part 5: Flow table test."
- [19] "EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens," 2009.
- [20] "EN 12390-13:2019 Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression," 2013.

# HIBRIDNI SUSTAVI I ODRŽIVA VODOOPSKRBA RE- WATER

## Hybrid systems and sustainable water supply RE- WATER

**Tatjana Džeba<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije,  
tatjana.dzeba@fgag.sum.ba

## Sažetak

Vodoopskrbni sustavi troše velike količine energije za podizanje vode na potrebne visinske kote da bi tu istu energiju uništavali u sustavima poput rasteretnih komora ili reducira tlaka. To povlači za sobom velike troškove za električnu energiju koji iznose cca 80% ukupnih troškova rada komunalnih poduzeća i njihovo poslovanje čini neodrživim. U isto vrijeme povećava se negativan utjecaj na okoliš stvaranjem i otpuštanjem stakleničkih plinova nastalih korištenjem energije dobivene iz fosilnih goriva. U radu je dan pregled dosadašnjih istraživanja hibridnih sustava koji razmatraju mogući koncept postizanja održivosti rada vodoopskrbnih sustava kombiniranjem vanjskih obnovljivih izvora energije i unutarnje energije vodoopskrbnih sustava s postojećim konvencionalnim izvorima energije uz optimizaciju rada crpne stanice i volumena vodospreme. Ovakav koncept predstavlja rješenje koje osigurava vrlo visok stupanj sigurnosti u opskrbi energijom, bolju kontrolu troškova i redukciju emisije CO<sub>2</sub>.

*Ključne riječi: vodoopskrba, hibridni sustavi, fotonaponska solarna energija (FN), optimizacija vodospreme, redukcija CO<sub>2</sub>*

## Abstract

Water supply systems use large amounts of energy to raise water to the required elevations in order to destroy that same energy in systems such as pressure relief chambers or pressure reducers. This entails high costs for electricity, which amount to approximately 80% of the total operating costs of utility companies, which means that their operations are not sustainable. At the same time, the negative impact on the environment increases due to the creation and release of greenhouse gases created by the use of energy obtained from fossil fuels. The paper provides an overview of the current research on hybrid systems that consider the possible concept of achieving the sustainability of water supply systems by combining external renewable energy sources and internal energy of water supply systems with existing conventional energy sources while optimizing the operation of the pumping station and the volume of the water reservoir. This concept represents a solution that ensures a very high degree of security in energy supply, better control of costs and reduction of CO<sub>2</sub> emissions.

*Keywords: water supply, hybrid systems, photovoltaic solar energy (PV), optimizing of the water reservoir, reduction CO<sub>2</sub> emissions.*

## 1. Uvod

Pitka voda kao socijalna kategorija mora se osigurati svim potrošačima. Korištenjem samo konvencionalnih izvora energije za rad crpnih stanica u vodoopskrbnom sustavu (VOS-u), uz nisku cijenu 1 m<sup>3</sup> pitke vode, vodoopskrbna poduzeća posluju s negativnim saldonom, i njihovo poslovanje nije održivo. Predmet istraživanja je odrediti mogući koncept održivosti vodoopskrbnog sustava (VOS) uporabom obnovljivih izvora energije, u uvjetima neravnomjernosti doticaja i otcicaja iz vodospreme, uz skladištenje viškova energije stvorenih integracijom obnovljivih izvora: energije Sunca kao vanjskog izvora obnovljive energije i neiskorištenom potencijalnom energijom u samom vodoopskrbnom sustavu kao unutarnjom energijom.

Cilj istraživanja je analizirati dosadašnja istraživanja u pogledu postizanje energetske održivosti vodoopskrbnih sustava i optimizacije vodospremničkog prostora u uvjetima kombiniranja solarne energije kao vanjskog izvora, unutarnje hidroenergije VOS-a i konvencionalnih izvora energije.

## 2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Sektori vodoopskrbe i zbrinjavanja otpadnih voda su značajni potrošači električne energije. U sektoru vodoopskrbe najveći potrošači električne energije su crpne stanice. Potrošnja električne energije ovisi o vrsti uslužne djelatnosti i različita je. Potrošnja energije koja se javlja pri crpljenju pitke vode iz glavne u distribucijske vodospreme iznosi 2–4 kWh/m<sup>3</sup>, za zahvatanje i crpljenje sirove vode potrošnja iznosi 0,4–0,8 kWh/m<sup>3</sup>, dok npr. za slučaj postupka desalinizacije (reverzna osmoza) pri obradi vode za piće potrošnja električne energije iznosi 2,5–4,5 kWh/m<sup>3</sup> [1]. Analizom podataka o potrošnji energije u Thames Water Utilities London (TWUL), izmjeren je energetski intenzitet vodnih usluga ovog komunalnog poduzeća u rasponu od 0,46–0,92 kWh/m<sup>3</sup> [2]. Jedan od rezultata studije za gradove Oslo u Norveškoj i Nantesa u Francuskoj je da bi se za nekoliko godina, uvodeći nove tehnologije te koristeći pravilno nusproizvode (bioplín i mulj iz otpadnih voda) moglo nadoknaditi do dvije trećine energije koju koriste komunalna poduzeća, te tako povećati njihova održivost [3].

Obnovljivi izvori energije (vjetar, voda, sunčeva energija, biodiesel, valovi, biomasa, termalna energija) najčešće se kombiniraju s konvencionalnim izvorima (prirodni plin,

ugalj, nafta, nuklearna energija)[4]. Dosadašnja istraživanja razmatraju različite hibridne sustave, razmatrajući pri tome različite kombinacije konvencionalnih i obnovljivih vanjskih i unutarnjih izvora energije.

Od vanjskih obnovljivih izvora energije, sunčeva energija je dostupna na dnevnoj razini, besplatna i dostupna na svakom mjestu gdje ljudi žive, a jakost zračenja i trajanje sunčeve svjetlosti ovisi o položaju i klimi određenog područja. Fotonaponska postrojenja (FN, eng-PV) pretvaraju sunčevu svjetlost izravno u električnu energiju. Solarna energija iz FN postrojenja se može uspješno koristiti u svim sustavima tijekom dana kada je električna energija najskuplja. Tijekom noći se mogu koristiti konvencionalni izvori energije, uskladištena energija u planiranom volumenu vodospreme [5], ili uskladištena energija iz ion-litijskih baterija što je skupo rješenje. Uloga vodospreme u FN sustavu proizvodnje električne energije može biti značajna i ovisi o period bilanciranja. Korištenje solarnih fotonaponskih (FN) ćelija u svrhu proizvodnje električne energije za rad crpnih stanica u vodoopskrbnom sustavu je već dobro poznata i uhodana tehnologija, i u pravilu se takvi hibridni sustavi sastoje od FN generatora, crpne stanice i vodospreme. Za rješenje problema pouzdanosti i učinkovitosti vodoopskrbnih sustava je u radu [6] prikazana i opisana Metoda kritičnog perioda (MKP), osmišljena upravo u tu svrhu, čime je napravljen matematički model kojim se dimenzioniraju energetske održivi urbani vodoopskrbni sustavi.

Unutarnja obnovljiva energija postoji u samom vodoopskrbnom sustavu kao neiskorištena potencijalna energija tečenjem vode kroz vodoopskrbne cijevi.

U radu [7] je naveden primjer dobre prakse korištenja unutarnje energije u gradu Boulder u Coloradu. Od 1985. se koristi 'višak' tlaka u vodoopskrbnom sustavu za proizvodnju električne energije. Grad danas ima osam objekata u kojima se kinetička energija vode iz vodovoda ugradnjom turbina u vodovodnu opskrbnu cijev pretvara u električnu energiju, i troši za određeni period rada crpne stanice zamjenjujući električnu energiju iz mreže.

Različiti izvori energije mogu se kombinirati gradeći integrirani hibridni energetski sustav koji nadopunjuje nedostatke koji postoje u svakom pojedinačnom energetskom rješenju. Jedan od primjera hibridnog modela istražen je u Portugalu 2010. godine [8]. Razmatrana je uporaba solarnog fotonaponskog sustava i vjetroelektrane kao obnovljivih izvora energije u kombinaciji s konvencionalnim izvorima energije iz elektro mreže, uz

optimizaciju rada crpnih stanica, te je dokazana njihova uloga u ostvarenju održivosti rada komunalnih poduzeća i smanjenju produkcije CO<sub>2</sub> pri proizvodnji energije. U rezultatima iz studije pokazano je slijedeće: Uporabom vodne turbine u ogranku gravitacijske cijevi preuzima se raspoloživi višak energije koji bi se raspršio u ventilu za smanjenje tlaka, i generira određena količina energije. Optimizacija rada crpke ne utječe na potrošnju energije, ali značajno smanjuje troškove za električnu energiju koristeći rad crpke u vrijeme nižih tarifa. Uključivanjem vjetroturbine u sustav za napajanje crpke za vodu troši se manja količina električne energije iz nacionalne električne mreže. Sve ovo snižava razinu emisije CO<sub>2</sub> za više od polovice u odnosu na uobičajeni način rada uz opskrbu energijom samo iz električne mreže.

U studiji također provedenoj u Portugalu 2020. godine [9] predstavljen je jedan drugi tip hibridnog sustava kao održivo tehničko rješenje proizvodnje električne energije iz obnovljivih vanjskih i unutarnjih izvora. Definiran je sustav za proizvodnju električne energije s FN solarnim i vjetroturbinskim postrojenjem, te s crpno-akumulacijskom hidroelektranom, predviđajući koliki je potrebni instalirani kapacitet za napajanje i skladištenje s odabirom volumena vodospreme uz uvjet proizvodnje samo iz navedenih obnovljivih izvora. Rezultat je za odabrane kapacitete bio 72%-tno zadovoljenje potrošnje uz najbolju tehničku alternativu uz najmanji trošak, s najmanjim povratom ulaganja, te je na taj način pokazan mogući koncept za postizanje energetske autonomije, fleksibilnosti i pouzdanosti rada vodoopskrbnog sustava.

Rad [10] analizira režime crpljenja vode i režime potrošnje vode s naglaskom na promjenu volumena vodospreme, a u svrhu izrade znanstveno inovativnog i inženjerski prihvatljivog matematskog modela. U cilju poboljšanja i održivosti rada vodoopskrbnog sustava, u radu [11] razvijena je desktop aplikacija (TankOPT) koja se lako instalira i pokreće na Windows operativnom sustavu, s jedinstvenim korisničkim prilagođenim sučeljem dizajniranim za lakše korištenje aplikacije. Aplikacija kao ulazni podatak prihvaća maksimalnu dnevnu potrošnju vode i raspodjelu potrošnje vode unutar dana (24 postotne vrijednosti, jedna za svaki sat u danu). Izlaz je rješenje koje je određeno za kombinacije početka i trajanja crpljenja vode u vodospremi, za koju se dobije minimalno potreban volumen vodospreme. Za izradu je korišten programski jezik JavaScript, a korištenje i rad aplikacije prikazani su kroz dva hipotetska primjera na kojima je pokazano da se razrađena metodologija i softverska aplikacija može koristiti za dimenzioniranje

vodospreme i podešavanje režima crpljenja vode kada su poznati režimi potrošnje, uz dodatnu pretpostavku da je vodovodna mreža dimenzionirana za zadovoljenje svih potreba za vodom. U sklopu daljnjeg razvoja aplikacije predviđen je rad na nadogradnji aplikacije za mogućnost diskontinuiranog punjenja vodospreme tijekom dana, što će zahtijevati značajno veću upotrebu računalne memorije. Ideja je također razviti rješenje za postojeći izgrađen vodoopskrbni sustav i vodospremu, s ciljem definiranja optimalnog režima crpljenja vode u odnosu na poznati režim potrošnje, što bi omogućilo razmatranje isplativosti punjenja vodospreme u različito doba dana (npr. tijekom noćnog razdoblja, kada je struja jeftinija, uz korištenje sunčeve energije tijekom dana za rad crpnih stanica), a sve u cilju minimiziranja ukupnih investicijskih i operativnih troškova.

Solarna Fotonaponska energija je postigla tehnološku i tržišnu zrelost da predvodi napore EU-a za postizanje energetske i klimatske ciljeve [12]. Unatoč postojećim razlikama u putovima razvoja i ambicijama, svi scenariji pokazuju veliki potencijal rasta za fotonaponska postrojenja u budućnosti, pod uvjetom da postoji poticajan politički okvir. Masovna implementacija solarne fotonaponske energije neće se dogoditi sama od sebe, već je potrebna aktivna podrška svih dionika. Još uvijek postoje brojne prepreke u rasponu od percepcije, zakonskih i regulatornih uvjeta. [13]

### 3. Zaključak

U radu navedeni primjeri dosadašnjih istraživanja primjene različitih obnovljivih (vanjskih i unutarnjih) izvora u hibridnim sustavima za rad crpnih stanica, sa ili bez kombiniranja s električnom energijom iz mreže proizvedenom iz konvencionalnih izvora, optimizacija rada crpki i iznalaženje optimalnog volumena vodospreme, te smanjenje gubitaka korištenjem raspoloživih tlakova u vodovodnoj mreži, stvaraju okvir mogućih rješenja održivosti rada vodoopskrbnih poduzeća. Potencijal rasta primjene fotonaponske solarne energije će ovisiti i o poticajima koji će se izdvajati za njenu primjenu ali i o povećanju učinkovitosti fotonaponskih solarnih sustava više od 20% [14]. Osobito je potrebno istaknuti važnost efekata smanjenja negativnog utjecaja na okoliš sa smanjenjem emitiranja CO<sub>2</sub>.

## Literatura

- [1] Margeta, J.: "A Framework for Application of Renewable Energy in Urban Water Systems", e-gfos., number 16, Osijek, Year 2018.,1-10, <https://doi.org/10.13167/2018.16.1>
- [2] Majid, A., Cardenes, I., Zorn, C., Russell, T., Colquhoun, K., Bañares-Alcantara, R., W.Hall, J.: "An Analysis of Electricity Consumption patterns in the Water and Wastewater Sectors in South East England", UK, Water 2020, vol 12 (issue 1.),2020., 225, <https://doi.org/10.3390/w12010225>
- [3] Vachon, M.: Nantes and Oslos urban water systems: Assessing benefits from water energy nexus interventions. Report number D1-2012-36, NTNU\_Trontheim, 2012., Norwegian University of Science and Technology
- [4] Sorensen, B., Breeze, P., Storvick, T., Shang-Tian Yang, S.-T., da Rosa, A., Gupta, H., Sukanta, R., Doble, M., Maegaard, P., Pistoia, G., Kalogirou, S., (2009.): Renewable Energy Focus Handbook, Elsevier Inc., Academic Press, Amsterdam, Nizozemska.
- [5] Đurin, B., Margeta, J., Jambrović, L. : "Analysis of the impact of the pumping station operating regime on required water reservoir volume". Inženjerstvo okoliša 2015, Vol2, No 1, 29-36, 2015.
- [6] Baić, L., Đurin, B.: *Analiza održivosti urbanog vodoopskrbnog sustava pokretanog sunčevom energijom i zavisnost veličina njegovih pojedinih dijelova*, Hrvatske vode, 24 (2016), 98, (285-294)
- [7] Prskalo, M., Džeba, T. Galić, A.: Sustainability of Water Supply Systems using internal and external Renewable energy sources, GNP 2022, Kolašin, Montenegro, May 2022
- [8] Ramos, M., Vieira,F., I.C. Covas, D.: "Energy efficiency in a Water supply system: Energy consumption and CO<sub>2</sub> emission", WaterScience and Engineering, 2010, 3(39, 331-340, doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2010.03.009
- [9] Simao, M., Ramos, H.: *Hybrid Pumped Hydro Storage Energy Solutions towards Wind and PV Integration: Improvement on Flexibility, Reliability and Energy Costs*, Water 2020, 12(9), 2457; <https://doi.org/10.3390/w12092457>Prezime, I., Prezime, I.: Naziv rada, Naziv časopisa, vol. N, godina, broj stranica (N1 – N2), DOI broj
- [10] Plantak, L.; Đurin, B.; Džeba, T.; Dadar, S. *Optimization of water reservoir volume in an urban water supply system*. Rev. Fac. Ing. Univ. Ant. 2021, 103, 1–17. [CrossRef]
- [11] Nakic, D.; Djurin, B.; Hunt, J.; Dadar, S. *A Novel Procedure for Minimizing the Volume of Water Tanks in Water Supply Systems*. Water 2022, 14, 1731. <https://doi.org/10.3390/w14111731>
- [12] Kougias, I., Taylor, N., Kakoulakit, G., Jäger-Waldau, A: *The role of photovoltaic for the European Green Deal and the recovery plan*, Elsevier, Renewable and Sustainable Energy reviews 144 (2021) 111017, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111017>
- [13] Jäger-Waldau, A: "Snapshot of photovoltaics-March 2021", EPJ Photovoltaics 12, 2 (2021), published by EDP Sciences, <https://doi.org/10.1051/epjpv/2021002aldau>
- [14] Green,M.A., Emery,K., Hishikawa,Y.,Warta,W.: *Solar cell efficiency tables (version 49), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25(3-13), 2017*





# ULOGA KEMIJSKIH DODATAKA ZA SAMOCIJELJENJE NA OTPORNOST CEMENTNIH KOMPOZITA NA CIKLUSE SMRZAVANJA I ODMRZAVANJA

The influence of self-healing chemical additives  
on the resistance of cementitious composites to  
freeze-thaw cycles

**Anita Gojević<sup>1</sup>, Ivanka Netinger Grubeša<sup>2</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, agojevic@gfos.hr

(2) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, nivanka@gfos.hr

## Sažetak

Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja smatraju se jednim od glavnih čimbenika smanjenja trajnosti materijala. Ponavljanje ovih ciklusa rezultira oštećenjem materijala, koje se javlja ili u obliku površinskog ljuštenja ili u obliku unutarnjeg raspucavanja. U radu se uspoređuje učinkovitost dvije kemijske metode samocijeljenja (kristalnog hidrofilnog dodatka i mikrokapsula) na otpornost cementnih kompozita na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Zamiješane su referentna mješavina morta te mješavina morta s dodatkom za samocijeljenje na bazi kristalizacije i mješavina morta s dodatkom za samocijeljenje u obliku kapsula s po 2% od svakog dodatka na masu cementa. Očvrslu uzorci morta izloženi su ciklusima smrzavanja i odmrzavanja prema normi HRS CEN/TS 12390-9:2016. Rezultati ispitivanja otpornosti morta na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ukazuju da bi ovdje korišteni kemijski dodaci za samocijeljenje mogli poboljšati otpornost cementnih kompozita na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

*Ključne riječi: kristalni hidrofilni dodaci, TDI mikrokapsule, cementni kompoziti, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, ljuštenje*

## Abstract

Freezing and thawing cycles are considered to be one of the main factors reducing the durability of materials. The repetition of these cycles results in damage to the material, which occurs either in the form of surface scaling or in the form of internal cracking. The paper compares the effectiveness of two self-healing chemical additives: crystalline hydrophilic additive and toluene diisocyanate (TDI) microcapsules, on the freeze/thaw resistance of cement composites. The reference mortar mixture, the mortar mixture with crystalline hydrophilic additive as well as the mortar mixture with TDI microcapsules (both additives added in 2% by cement weight) were prepared. Hardened mortar samples are subjected to freezing and thawing cycles according to the norm HRS CEN/TS 12390-9:2016. The testing results indicate that self-healing chemical additives used here could improve resistance of the cement composites to freeze/thaw cycles.

*Keywords: crystalline hydrophilic additive, TDI microcapsules, cement composites, freeze/thaw resistance, scaling*

## 1. Uvod

Trajnost građevine je jedan od glavnih zahtjeva koji se postavlja na građevne materijale. Jedan od glavnih čimbenika umanjenja trajnosti materijala smatraju se ciklusi smrzavanja i odmrzavanja [1]. Voda prisutna u materijalu prilikom pada temperature ispod ništice se smrzava i prelazi u led koji ima veći volumen od same vode iz koje je nastao, a tako formiran led stvara naprezanja na stijenke materijala [2] što uslijed ponavljanih ciklusa smrzavanja/odmrzavanja dovodi do oštećenja materijala. Takva se oštećenja kod cementnih kompozita javljaju ili u obliku površinskog ljuštenja ili u obliku unutarnjeg raspucavanja [3]. Sposobnost cijeljenja pukotina u betonu je već poznat fenomen, naročito kada je riječ o autogenom ili prirodnom samocijeljenju [4]. Naime, prilikom raspucavanja betona, nehidratizirane čestice cementa reagiraju s ulaznom vodom. Ova reakcija ponovno započinje proces hidratacije i stvara produkte hidratacije koji će popuniti pukotine. Autogenim zacjeljivanjem mogu zacijeliti pukotine do 0,1 mm [5, 6]. U današnje vrijeme se sve više koriste umjetne metode samocijeljenja, tzv. autonomno samocijeljenje, koje cijeli i pukotine veće širine. Tehnike autonomnog samocijeljenja uključuju primjenu kristalnih hidrofilnih dodataka, metodu bakterija i metodu mikrokapsulacije [7]. Danish [7] sistematizira metode samocijeljenja na kemijske (kristalni hidrofilni dodaci i mikrokapsule) i biološke (bakterije). Uporaba kemijskih dodataka za samocijeljenje za poboljšanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja je slabo istražena tema. Ovaj rad uspoređuje učinkovitost kristalnog hidrofilnog dodatka i mikrokapsula na otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

## 2. Eksperimentalni dio

### 2.1. Mješavine morta

U eksperimentalnom dijelu rada zamiješane su 3 mješavine; referentna mješavina - R, mješavina s dodatkom za samocijeljenje na bazi kristalizacije (PenetronAdmix) – M1 te mješavina s dodatkom za samocijeljenje napravljenim u obliku kapsula – M2. Za spravljanje mješavina je korišten cement CEM II/A-M (S-V) 42,5 N gustoće 3,0 kg/dm<sup>3</sup> te pijesak gustoće 2,65 kg/dm<sup>3</sup>. Za pripremu mikrokapsula izvagano je 10 g parafinskih kuglica koje su potom stavljene na zagrijavanje na 75°C do potpunog taljenja. Zatim je

dodano 20 g toluen diizocijanata (TDI) te je smjesa miješana mehaničkom miješalicom tijekom 3 h uz konstantnu temperaturu od 75 °C i 600 rpm. Prestankom zagrijavanja u smjesu je dodano 100 cm<sup>3</sup> perfluorotributilamin (PFTBA) uslijed čega je došlo do stvaranja mikrokapsula koje su izolirane vakuumskom filtracijom i sušene na temperaturi od 40 °C kroz 24h. Kemijski dodaci za samocijeljenje su dozirani u mješavinu u iznosu 2% mase cementa. Tablicom 1 su prikazani sastavi mješavina morta.

**Tablica 1.** Sastavi mješavina morta

Mješavina	Sadržaj komponente (g)				
	Cement	Pijesak	Voda	Dodatak na bazi kristalizacije	Kapsule
R	450	1550	225	-	-
M1	441	1550	225	9	-
M2	441	1550	225	-	9

Na mješavinama morta ispitana je konzistencija sukladno normi EN 1015-3:2000/A1:2005 [8].

**Tablica 2.** Rezultati ispitivanja konzistencije morta

Mješavina	R	M1	M2
Konzistencija (cm)	21	20	23

## 2.2. Ispitivanje otpornosti morta na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

U nastavku je svježi mort ugrađen u kalup za prizmice izmjera 4x4x16 cm. Uzorci očvrstlog morta su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa i potopljani u vodu do 28. dana starosti. Nakon 28 dana njegovanja u vodi, prizme su stavljene u kalupe izrađene od stiropora pri čemu su rubovi oko gornje plohe prizmi i kalupa zabrtvljeni sanitarnim silikonom. 3%-tna otopina NaCl i destilirane vode izlivena je na saturirane uzorke. Tako pripremljeni uzorci su stavljani u komoru te tretirani kako to propisuje HRS CEN/TS 12390-9:2016 [9].

## 2.3. Rezultati ispitivanja i diskusija

Nakon 28. i 56. ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, uzorci su izvađeni iz komore te je odlivena 3%-tna otopina NaCl i destilirane vode s njih. Voda se odlijevala zajedno s

materijalom koji je nastao ljuštenjem betona uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Voda se odlijevala preko filter papira kako bi se sakupio sav oljušteni materijal. Mase (m) i količina oljuštenog materijala po jedinici ploštine (a) prikazane su tablicom 3.

**Tablica 3.** Mase i količina oljuštenog materijala nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Mješavina/Prizma	R		M1		M2	
	m (g)	a (kg/m <sup>2</sup> )	m (g)	a (kg/m <sup>2</sup> )	m (g)	a (kg/m <sup>2</sup> )
1	4,97	0,78	3,57	0,56	8,01	1,25
2	5,34	0,83	5,27	0,82	6,21	0,97
3	6,86	1,07	3,33	0,52	6,61	1,03
4	8,54	1,33	6,32	0,99	4,08	0,64
5	8,60	1,34	2,95	0,46	5,01	0,78
6	9,76	1,53	2,40	0,38	3,90	0,61
<b>Σ/prosječna vrijednost standardna devijacija</b>	44,07	1,15; 0,3	23,84	0,62; 0,23	33,82	0,88; 0,25

Iz tablice 3. zaključeno je da je gubitak mase uslijed 28 ciklusa smrzavanja i zamrzavanja kod oba uzorka s kemijskim dodacima za samocijeljenje (M1 i M2) manji nego kod referentnog betona R. Ovo znači kako je uporaba dodatka za samocijeljenje na bazi kristalizacije (M1) te dodatka za samocijeljenje napravljenim u obliku kapsula (M2) poboljšala otpornost cementnih kompozita na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

### 3. Zaključak

Rad uspoređuje učinkovitost dvije kemijske metode samocijeljenja (kristalnog hidrofilnog dodatka i mikrokapsula) na otpornost cementnih kompozita na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Mikrokapsule korištene u ovom radu samostalno su izrađene od toluen diizocijanata kao jezgre i parafina kao opne kapsula. Zamiješane su 3 mješavine morta; referentna mješavina te mješavina s dodatkom za samocijeljenje na bazi kristalizacije i mješavina s dodatkom za samocijeljenje u obliku kapsula s po 2% od svakog dodatka na masu cementa. Očvrslili uzorci morta izloženi su ciklusima smrzavanja i odmrzavanja prema normi HRS CEN/TS 12390-9:2016 [9]. Rezultati ispitivanja otpornosti morta na cikluse

smrzavanja i odmrzavanja ukazuju da bi ovdje korišteni kemijski dodaci za samocijeljenje mogli poboljšati otpornost cementnih kompozita na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

## Literatura

- [1] Koroth, S. R., Evaluation and Improvement of Frost Durability of Clay Bricks - A Thesis in The Centre for Building Studies, Ottawa, Canada, 1997.
- [2] Pilehvar, S.; Szczotok, A. M.; Rodríguez, J. F.; Valentini, L.; Lanzón, M.; Pamies, R.; Kjøniksen, A.-L., Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials, *Construction and Building Materials*, 200, 2019, 94-103, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.057>
- [3] Richardson, M. G., *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, First Edition, Spon Press, 2002, pp. 51, 77, 101, 133, 160-179, 194, <https://doi.org/10.1201/9781482272109>
- [4] Byoung Sun, P., & Young, C. C., Investigating a new method to assess the self-healing performance of hardened cement pastes containing supplementary cementitious materials and crystalline admixtures, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(6), 6058-6073, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.080>
- [5] Žáková, H.; Pazderka, J.; Reiterman, P., Textile Reinforced Concrete in Combination with Improved Self-Healing Ability Caused by Crystalline Admixture, *Materials* 2020, 13, 5787, <https://doi.org/10.3390/ma13245787>
- [6] Park, B.; Choi, Y.C., Effect of healing products on the self-healing performance of cementitious materials with crystalline admixtures, *Constr. Build. Mater.* 2020, 270, 121389, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121389>
- [7] Danish, A.; Mosaberpanah, M. A.; Salim, M. U., Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: A critical review on efficiency of implemented treatments. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.053>
- [8] EN 1015-3:1999, Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table); CEN: Brussels, Belgium, 1999
- [9] HRS CEN/TS 12390-9:2016, Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling; CEN: Brussels, Belgium, 2006

**PRELIMINARNA  
JEDNOSTAVNE  
IZLOŽENE NESTACIONARNOM ZAGRIJAVANJU**

**ANALIZA  
ALUMINIJSKE**

**PONAŠANJA  
KONSTRUKCIJE**

**Preliminary analysis of the behaviour of simple  
aluminium structure exposed to transient heating**

**Marko Goreta<sup>1</sup>, Neno Torić<sup>1</sup>, Ivica Boko<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

e-mail: mgoreta@gradst.hr, ntoric@gradst.hr, iboko@gradst.hr



## Sažetak

U ovom radu prikazana je preliminarna studija utjecaja deformacije od puzanja na nosivost stupova u jednostavnoj okvirnoj aluminijskoj konstrukciji izloženoj nestacionarnom zagrijavanju. Numerička analiza bazirana je na nedavno provedenim istraživanjima u okviru kojih je kalibriran postojeći model puzanja na epruvetama legure EN AW 6082 T6. Navedeni model je verificiran eksperimentalno-numeričkim istraživanjem provedenim na aluminijskim stupovima visine 2590 mm za različite omjere vanjskog opterećenja i brzine zagrijavanja. Trenutnim normama za projektiranje aluminijskih konstrukcija izloženih požarnom djelovanju nedostaje pouzdanih istraživanja za određivanje točnog utjecaja deformacije od puzanja na stupove. Učinak puzanja je u trenutnoj inačici normi implicitno uzet u obzir u obliku faktora 1.2 uz pretpostavku da pokriva sve aspekte smanjenja nosivosti neovisno o brzini zagrijavanja. Budući da brzina zagrijavanje značajno utječe na razvoj deformacije od puzanja, a samim ti i na brzinu otkazivanja stupa, potrebno je provesti detaljnu studiju na ovu temu.

*Gljučne riječi: puzanje, nestacionarno zagrijavanje, stupovi, aluminij*

## Abstract

A preliminary study of the influence of creep strain on the load-bearing capacity of columns in a simple frame aluminium structure exposed to transient heating is presented in this paper. Numerical analysis is based on recent research in which the existing creep model was calibrated on EN AW 6082 T6 alloy coupons. This model was verified by experimental-numerical research conducted on aluminium columns with a height of 2590 mm for different ratios of external load and heating rate. Current standards for the design of aluminium structures exposed to fire lack reliable research to determine the exact impact of creep strain on columns. The creep effect is implicitly taken into account in the current version of the standard in the form of a factor of 1.2 assuming that it covers all aspects of load reduction regardless of the heating rate. Since the heating rate greatly affects the development of creep deformation, and therefore the rate of failure of the column, it is necessary to conduct a detailed study on this topic.

*Keywords: creep, transient heating, columns, aluminium*

## 1. Uvod

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, aluminij slovi kao jedan od najvećih potencijala za implementaciju u svakodnevnoj građevinskoj praksi zbog svojih povoljnih materijalnih karakteristika (čvrstoća, otpornost na koroziju, duktilnost...) koji se postižu u kombinaciji s različitim legirajućim elementima (mangan, silicij, cink, bakar). Ukupna materijalna aluminijskih legura, osim o legirajućem elementu, također značajno ovise o načinu toplinske obrade ili temperiranju. Najznačajniji nedostatak legura aluminija je osjetljivost na visoke temperature koji je posljednjih tridesetak godina predmet mnogih znanstvenih istraživanja i diskusija. Temperatura tališta aluminija je pri temperaturi od oko 660°C, ali pad nosivosti nastupa već pri temperaturama iznad 100°C [1]. Također, aluminij ima i visoku toplinsku vodljivost što rezultira bržim prijenosom topline pa i smanjenjem čvrstoće u odnosu na najčešće korišten konstrukcijski čelik. Povećanje temperature u građevinskim konstrukcijama najčešće je izazvano požarom kao izvanrednim djelovanjem.

### 1.1. Djelovanje požara na konstrukcije

Požar je nekontrolirano gorenje koje nanosi znatnu materijalnu štetu i jako često ugrožava ljudske živote. Najosjetljiviji dio konstrukcije izložene požaru su stupovi s obzirom da njihovim urušavanjem najčešće dolazi do progresivnog kolapsa cijelog objekta. Ukupna deformacija elemenata izloženih povišenim temperaturama može se izraziti s (1)

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{\sigma}(T) + \varepsilon_{cr}(\sigma, T, t) \quad (1)$$

gdje je  $\varepsilon_{th}(T)$  temperaturna deformacija, ovisna samo o koeficijentu linearnog toplinskog istezanja ( $\alpha=23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  za aluminij),  $\varepsilon_{\sigma}(T)$  deformacija od vanjskoga opterećenja (izražena  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagramom ponašanja materijala) te  $\varepsilon_{cr}(\sigma, T, t)$  deformacija od puzanja materijala.

### 1.2. Utjecaj puzanja prema važećim propisima

Trenutnim propisima za proračun aluminijskih konstrukcija izloženih požarnom djelovanju EN 1999-1-2 [2] proračunska otpornost na izvijanje tlačno opterećenog elementa u nekom vremenu  $t$  izražena je preko (2)

$$N_{b,fi,t,Rd} = k_{0,\theta,max} \cdot N_{b,Rd} \cdot \frac{\gamma_{M1}}{1,2 \cdot \gamma_{M,fi}} \quad (2)$$

gdje je:  $N_{b,Rd}$  - otpornost na izvijanje u skladu s EN 1999-1-1

$k_{0,\theta,max}$  - faktor smanjenja dogovorne granice popuštanja pri 0,2% trajnoj deformaciji pri maksimalnoj temperaturi aluminija

1,2 – faktor smanjenja proračunske otpornosti zbog puzanja aluminijskih legura

Puzanje ovisi o svojstvima materijala, vanjskom opterećenju i vremenu, te mikrostrukтури legure. Prema navedenoj normi, za temperaturu aluminija iznad 170°C i trajanju izloženosti duljoj od 30 minuta potrebno je posebno razmotriti učinke prolaznoga (nestacionarnog) toplinskoga puzanja budući su gotovo svi propisi utemeljeni na stacionarnim testovima. Stacionarni se testovi izvode tako da element zagrijemo na željenu temperaturu pa ga inkrementalno opterećujemo do loma. Nestacionarni testovi predstavljaju realnije ponašanje konstrukcije prilikom požara s obzirom da se oni izvode na način da je opterećenje kroz cijeli test konstantno, dok je element izložen konstantnoj brzini zagrijavanja. Generalno, stacionarni testovi su jednostavniji za izvedbu pa su samim tim i zastupljeniji u literaturi dok su nestacionarni testovi zbog svoje složenosti uglavnom ograničeni na manje uzorke zbog potrebe za kontinuiranim praćenjem i korekcijom parametara tijekom cijeloga testa puzanja.

## 2. Pregled dosadašnjega područja istraživanja

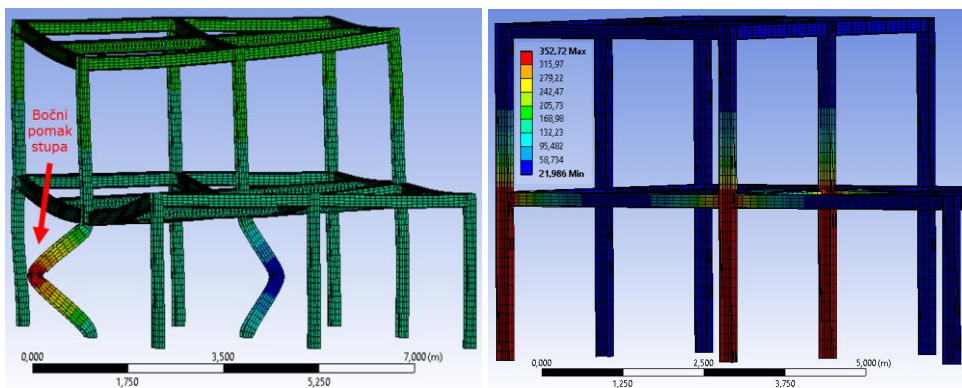
Prvi značajni znanstveni doprinos vezano za puzanje aluminija pri povišenim temperaturama dali su Dorn [3] i Harmathy [4] sredinom prošloga stoljeća u obliku različitih empirijskih formula za proračun deformacije od puzanja.

Ispitivanje utjecaja deformacije od puzanja na nosivost cijevnih aluminijskih stupova legure 6082 T6 pri povišenim temperaturama proveli su Amdahl i Langhelle [5]. Glavni zaključci njihovih studija su da je deformacija od puzanja značajna samo u zadnjoj fazi stacionarnoga testa na temperaturama iznad 200°C te da prevelika brzina zagrijavanja u nestacionarnim testovima (korištena 5 i 12°C/min) nema značajan utjecaj na nosivost s obzirom da se deformacija od puzanja ne može zabilježiti zbog brzog otkazivanje stupa. Maljaars [6, 7] je u okviru svojih studija proveo nestacionarne testove brzinom zagrijavanja od 1.6 °C/min do 11 °C/min na kružnim i pravokutnim cijevnim stupovima. Najvažniji zaključci njegove studije su da je kritični interval za razvoj deformacije od puzanja

aluminijских легура из серије 5xxx i 6xxx од 170 °C до 350 °C оvisно о брзини загријавања и оптерећењу, те да се тренутни прописи за алуминијске конструкције изложене požару требaju преиспитати за реалну примјену будући су базирани на стационарним тестовима. Torić et al. [8, 9] су у оквиру пројекта Хрватске закладе за зnanost под називом „Утјецaj деформација од пужања на носивост челичних и алуминијских ступова при дјеловању požара“ провели стационарне тестове на епруветама и ступовима легуре 6082 Т6 и истакнули да је критични интервал у којем се развија деформација од пужања у распону од 150 °C до 300 °C за наведену легуру.

### 3. Model konstrukcije i analiza rezultata

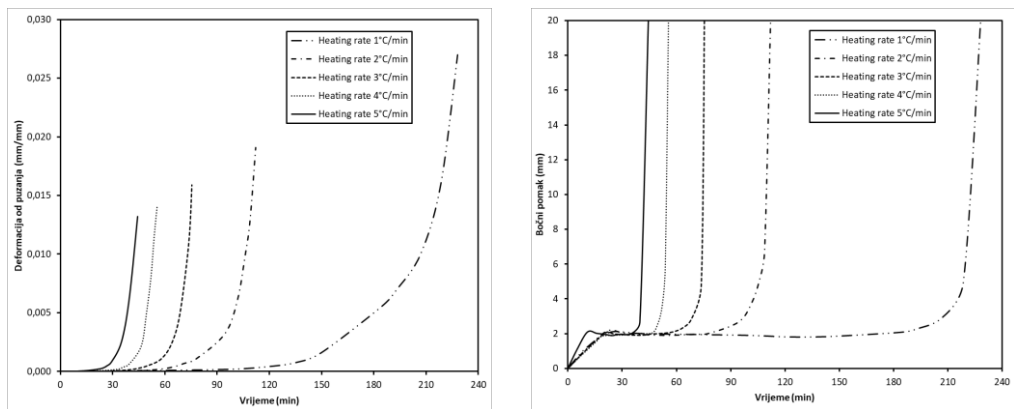
U ovom radu prikazano je na koji način deformacija od puzanja utječe na brzinu otkazivanja zagrijanih stupova jednostavne aluminijске konstrukcije. Za izradu geometrije i provedbu numeričkih simulacija korišten je računalni program ANSYS Workbench 16.2 [10]. Stupovi i grede dvoetažne, okvirne konstrukcije modelirani su I profilima aluminijске легуре EN AW 6082 Т6. Visina etaže iznosi 2590 mm, a rasteri greda su 4000 mm u jednom i 3000 mm u drugome smjeru. Visina korištenoga poprečnoga presjeka je 220 mm, a širina 170 mm s debljinama pojasnica od 14 mm te hrpta od 8 mm. Na slici 1. prikazane su pozicije stupova zagrijanih različitim brzinama zagriјавања (1-5 °C/min) i opterećeni konstantnim opterećenjem od 3 kN/m<sup>2</sup>.



**Slika 1.** 3D model konstrukcije - Lijevo (Zagrijavani stupovi); Desno (Popuštanje stupova)

Prosječna mreža konačnih elemenata za prikazane simulacije, također vidljiva na slici 1, iznosila je 50 mm, a korišteni su SOLID187 elementi definirani s ukupno deset čvorova (tri stupnja slobode po čvoru). Navedeni konačni elementi koriste se za složene proračune

puzanja, plastičnosti, velikih progiba i velikih deformacija, a njihova geometrija te cjelokupna procedura rješavanja prikazana je u ANSYS-ovom priručniku [11]. Materijalni model ponašanja navedene legure definiran je prema rezultatima ispitivanja epruveta [8]. Rezultati dobiveni iz navedene studije uključeni su u simulacije kroz Multilinearni model izotropnoga očvršćivanja dostupan u ANSYS-u. Navedeni je model zasnovan na omjeru naprezanja i plastične deformacije pri specifičnim temperaturama. Korišteni model puzanja i njegovi koeficijenti prikazani su u radu [1], gdje je kalibriran postojeći model puzanja na epruvetama legure EN AW 6082 T6. Rezultati provedene analize prikazani su na slici 2.



**Slika 2.** Deformacija od puzanja i bočni pomak za različite brzine zagrijavanja

Iz rezultata je vidljivo kako sporija brzina zagrijavanja rezultira većom deformacijom od puzanja. Niska brzina zagrijavanja prikladna je za konstrukcije s obzirom da današnji propisi vezani za otpornost na požar uglavnom zahtijevaju neki oblik protupožarne zaštite aluminijskih konstrukcija. Imajući u vidu da nijedna vrsta zaštite ne štiti element u potpunosti već dolazi do prodora topline, na ovaj način je simulirano ponašanje sporo zagrijavanog elementa i zabilježen utjecaj deformacije od puzanja na nosivost glavnih stupova konstrukcije.

## Literatura

- [1] M. Goreta, N. Torić, and I. Boko, "Calibration of an Existing Creep Model for Analysis of Aluminium Members Exposed to Constant Temperature," *Int. J. Eng. Model.*, vol. 34, no. 2, pp. 1–15, 2021, doi: 10.31534/engmod.2021.2.ri.01m.
- [2] European Committee for Standardization, "EN 1999-1-2 (2007), Eurocode 9 - Design of Aluminium Structures - Part 1-2: Structural fire design." Brussels, Belgium, 2007.
- [3] J. E. Dorn, "Some fundamental experiments on high temperature creep," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 3, no. 2, 1955, doi: 10.1016/0022-5096(55)90054-5.
- [4] T. Z. Harnathy, "A Comprehensive Creep Model," 1967.
- [5] N. K. Langhelle and J. Amdahl, "Experimental and numerical analysis of aluminium columns subjected to fire," *Proc. Int. Offshore Polar Eng. Conf.*, vol. 4, pp. 406–413, 2001.
- [6] J. Maljaars, F. Soetens, and H. H. Snijder, "Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 1: Tests," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 11, pp. 1404–1417, 2009, doi: 10.1016/j.tws.2009.02.008.
- [7] J. Maljaars, F. Soetens, and H. H. Snijder, "Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 2: Finite element models," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 11, pp. 1418–1428, 2009, doi: 10.1016/j.tws.2008.06.003.
- [8] N. Torić, J. Brnić, I. Boko, M. Brčić, I. W. Burgess, and I. Uzelac, "Experimental analysis of the behaviour of aluminium alloy EN 6082AW T6 at high temperature," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 4, 2017, doi: 10.3390/met7040126.
- [9] N. Torić, I. Boko, I. W. Burgess, and V. Divić, "The effect of high-temperature creep on buckling behaviour of aluminium grade EN6082AW T6 columns," *Fire Saf. J.*, vol. 112, no. December 2019, 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.102971.
- [10] A. D. Canonsburg, "ANSYS, PA 15317, Release 16.2." 2015.
- [11] Ansys inc., "Theory Reference," no. January, 2020.



# EKSPERIMENTALNA STUDIJA PRIMJENE LOKALNOG DRVA LISTAČA U IZRADI LIJEPLJENIH LAMELIRANIH NOSAČA

Experimental analysis of the application of local  
hardwood in the production of GLULAM

**Tin Hržić<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, tin.hrzc@gradst.hr



## Sažetak

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu u suradnji s tvrtkom Drvene konstrukcije d.o.o. provodi istraživački projekt *Povećanje razvoja novih proizvoda drvne industrije koji se koriste u građevini*. Cilj projekta je razvoj novih proizvoda, lijepljenih lameliranih nosača (LLN) od drva lišćara, koristeći drva porijeklom iz Hrvatske. Stečena znanja uz primjenu suvremene KET tehnologije pripremaju tvrtku za tržište na kojem će se u budućnosti povećati potražnja za LLN od drva lišćara. U Laboratoriju za konstrukcije Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu trenutno se provode ispitivanja mehaničkih svojstava lameliranih nosača.

U ovom radu predstavljeni su trenutni rezultati ispitivanja lijepljenih lameliranih nosača od drva običnog graba.

*Ključne riječi: lijepljeni lamelirani nosači, drvo lišćara, mehanička svojstva*

## Abstract

The Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy of the University of Split, in cooperation with the company Drvene konstrukcije d.o.o. is conducting a research project *Increasing the development of new wood industry products used in construction*. The goal of the project is the development of new products, glued laminated girders (GLULAM) made of hardwood, using wood originating from Croatia. The acquired knowledge with the application of modern KET technology prepares the company for the market where the demand for hardwood glulam will increase in the future. In the Structures Laboratory of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy of the University of Split, tests of the mechanical properties of laminated beams are currently being carried out. This paper presents the current test results of glued laminated beams made of common hornbeam wood.

*Keywords: glulam, hardwood, mechanical properties*

## 1. Uvod

Lijepljeni lamelirani nosači se trenutno proizvode većinom od drva četinjača (smreka, jela, bor, ariš). Povoljan omjer mase i čvrstoće te jednostavnija tehnologija proizvodnje, prvenstveno lijepljenje i površinska obrada, opravdavaju njihovu široku primjenu u građevinarstvu. Međutim, kontinuirano pošumljavanje i klimatske promjene rezultirale su pojavom većeg udjela tvrdih listača (bukva, hrast, pitomi kesten, jasen) u europskim šumama [1]. Detaljne karakteristike i razlike između različitih vrsta tvrdih listača opisane su u preglednom radu [2]. Očekuje se da će tvrde listače povećati svoj udio u odnosu na četinare u drugim dijelovima Europe zbog svoje prilagodljivosti novim klimatskim uvjetima. Sukladno tome, povećava se broj studija o korištenju drva tvrdih listača za izradu lijepljenih lameliranih nosača. Drvo tvrdih listača ima bolja mehanička svojstva u pogledu trajnosti, vatrootpornosti i estetike u usporedbi s drvom četinara. Neki nedostaci drva tvrdih listača su veća vlastita težina u odnosu na drva četinara, teža obradivost, osjetljivost na upijanje vlage, bubrenje i skupljanje.

Korištenje lijepljenih lameliranih nosača od drva tvrdih listača trenutno nije obuhvaćeno normama već se oni proizvode i dimenzioniraju na temelju izdanih tehničkih dopuštenja [3]. Svako pojedino tehničko dopuštenje mjerodavno je isključivo za proizvodnju nosača od drva s istog područja za koje je izdano dopuštenje [4].

## 2. Izbor drva za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača (LLN-a)

Prema trenutno dostupnim podacima, najzastupljenije vrste drva u Hrvatskoj su bukva, hrast lužnjak, hrast kitnjak, grab, jela, jasen i smreka [5]. Za izradu lijepljenih lameliranih nosača koji se ispituju u sklopu studije odabrano je drvo običnog graba. Obični grab (*Carpinus betulus*) je listopadno drvo srednje veličine i sporog rasta. Stablo ima gustu i razgranatu krošnju, visinu do 25 m te deblo promjera do 70 cm. Drvo graba je tvrdo i zahtjevno za obradu zbog čega trenutno nema široku primjenu u građevinarstvu, a zbog visoke kalorične vrijednosti većinom se koristi kao drvo za ogrjev. Rasprostranjen je na području južne i srednje Europe te jugozapadne Azije.

Na slici 1 prikazana je rasprostranjenost običnog graba. Preliminarni testovi pokazali su da ova vrsta drva posjeduje izrazita mehanička svojstva. Također, drvo graba je lako dostupno u velikim količinama što omogućava povoljnu komercijalnu izradu nosača za

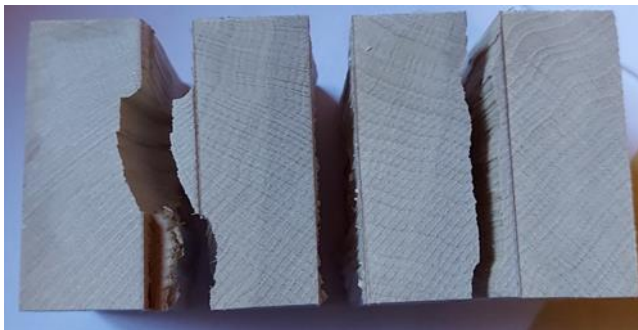
upotrebu u građevinskim konstrukcijama. Upravo zbog ova dva razloga drvo graba odabrano je za sirovinu pri izradi lijepljenih lameliranih nosača. Budući da drvo graba nije obuhvaćeno u [4], njegova primjena za izradu LLN obuhvaća eksperimentalna ispitivanja lamela, integriteta lijepljenog spoja i samih nosača.



**Slika 1.** Rasprostranjenost običnog graba [6]

### 3. Ispitivanje integriteta lijepljenog spoja

Integritet lijepljenog spoja kod LLN obično se potvrđuje preko otpornosti na raslojavanje ili određivanjem posmične čvrstoće, ovisno o okolišu kojem će nosač biti izložen.



**Slika 2.** Uzorci nakon posmičnog testa lijepljene plohe

Ljepila i tehnologije lijepjenja koje se uspješno koriste za lijepljene lameliranih nosača od drva četinaru ne mogu se koristiti za lijepljenje drva tvrdih listača bez korekcija u procesu lijepjenja jer veća gustoća drva uzrokuje sporije prodiranje ljepila kroz njegovu strukturu [7, 8].

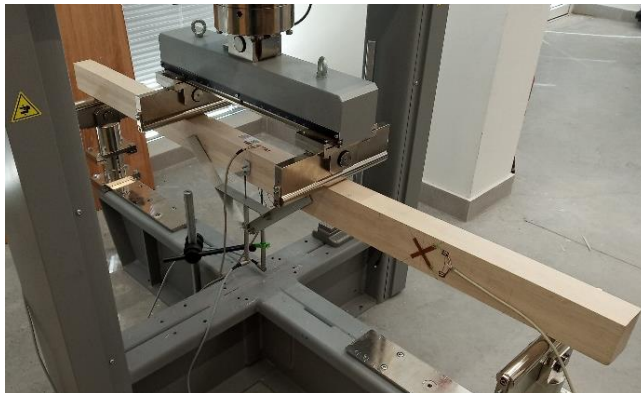
Niska otpornost na raslojavanje najveći je problem lijepljenih lamela od drva tvrdih listača. Stoga odabir idealnog ljepila i postupka lijepljenja predstavlja temelj za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača od drva tvrdih listača koji su pogodni za izradu nosivih konstrukcija.

Za testiranje integriteta lijepljenog spoja izrađeno je 20 testnih uzoraka. Uzorci su zaljepljeni na isti način kao LLN nosači, korištenjem komercijalnih ljepila, ali uz duže otvoreno vrijeme. Srednja posmična čvrstoća ispitanih uzoraka iznosi  $f_v = 20 \text{ N/mm}^2$ . Svi uzorci otkazali su po drvu čime je dokazan integritet lijepljenog spoja i validnost procesa lijepljenja.

#### 4. Ispitivanje mehaničkih svojstava LLN-a od drva graba

Nosači su dimenzija 60 mm/80 mm/1700 mm i izrađeni od 4 zaljepljene lamele debljine 2cm. Uzorci se ispituju prema normi HRN EN 408 [9].

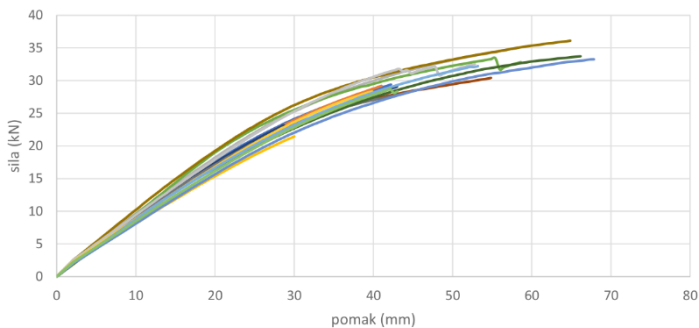
Određuje se savojna čvrstoća nosača, globalni modul elastičnosti, lokalni modul elastičnosti i modul posmika. Ispitivanje se vrši prema standardiziranom protokolu, uz konstantni prirast pomaka.



**Slika 3.** Nosač neposredno prije opterećenja

Na Grafu 1. prikazane su krivulje sila-pomak za neke od ispitanih uzoraka iz kojih su određeni parametri mehaničkih svojstava nosača.

Srednja vrijednost lokalnog modula elastičnosti ispitanih nosača iznosi  $18\,556 \text{ N/mm}^2$ .



**Graf 1.** Sila-pomak krivulje nekoliko ispitanih nosača

Srednja vrijednost savojne čvrstoće ispitanih nosača iznosi  $123,3 \text{ N/mm}^2$  i može se zaključiti da nosači izrađeni od običnog graba imaju izvrsnu savojnu čvrstoću u usporedbi sa trenutno najzastupljenijim LLN od jele i smreke.

## 5. Zaključak

Kao rezultat klimatskih promjena, udio tvrdog drva u europskim šumama nastavit će rasti. Njihove mehaničke karakteristike čine ih superiornima kod premošćivanja većih raspona u odnosu na uvriježene LLN-e od jele i smreke. Veće čvrstoće omogućuju odabir vitkijih elemenata, što je u skladu i sa arhitektonskim trendovima. U zadnja dva desetljeća srednja Europa premostila je nedostatak tehnologije lijepljenja listača i popularizirala njihovu primjenu za izradu LLN. Međutim, karakteristike drva variraju ovisno o vrsti i porijeklu, pa je stoga prije stavljanja građevinskog proizvoda na tržište potrebno uskladiti ga sa zahtjevima struke. Kod primjene listača još uvijek uočavamo nedostatak propisa za njihovu primjenu u izradi LLN-a, kao i nedostatak dostupnih rezultata o njihovim mehaničkim karakteristikama. Rezultati provedenih ispitivanja pokazuju da se od drva graba lokalnog podrijetla mogu izraditi nosači povoljnih mehaničkih karakteristika.

## ZAHVALA

Ovo istraživanje je djelomično podržano kroz projekte :

- IRI-2 KK.01.2.1.02.0330 -Povećanje razvoja novih proizvoda drvne industrije koji se koriste u građevini
- KK.01.1.1.02.0027, projekt koji sufinanciraju Vlada RH i Europska unija kroz Europski fond za regionalni razvoj - Operativni program Konkurentnost i kohezija

## Literatura

- [1] European Assessment Document – EAD 130320-00-0304
- [2] European Environment Agency: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, An indicator-based report, 2017.
- [3] Uzelac Glavinić I., Boko I., Torić N., Lovrić Vranković J. (2020). Application of hardwood for glued laminated timber in Europe. *Građevinar* 72, 607-616.
- [4] Informationsdienst Holz: Spezial - Konstruktive Bauprodukte aus europäischen Laubhölzern, Informationsverein Holz e. V., 2017
- [5] Hrvatske šume d.o.o. Šumskogospodarska osnova, uređajni zapisnik, 2017.
- [6] Wikimedia, [www.commons.wikimedia.org/wiki/File:Carpinus\\_betulus\\_range.svg](http://www.commons.wikimedia.org/wiki/File:Carpinus_betulus_range.svg), pristupljeno: 19.7.2022
- [7] Bernasconi A. (2014). Verleimung von Laubholz für den tragenden Einsatz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 12, 533–539.
- [8] Van de Kuilen J.W., Schaffrath J. (2014). Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, München.
- [9] HRN EN 408:2012: Drvene konstrukcije -- Konstrukcijsko drvo i lijepljeno lamelirano drvo -- Određivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava



# RAZVOJ MODULA DRVENE ZIDNE OBLOGE - analiza dimenzija, proporcija i oblika

## Wood Wall Module Covering Development - Dimension, Proportion and Shape Analysis

**Marija Krajnović<sup>1</sup>, Domagoj Mamić<sup>2</sup>, Luka Brzić<sup>3</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, mkrajnovic@gfos.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, dmamic@sumfak.hr



## **Sažetak**

U radu se opisuje istraživački projekt razvoja inovativnih drvnih zidnih obloga u poduzeću Spačva d.d.. Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek partner je na projektu s istraživačkom grupom koja se bavi razvojem estetsko-oblikovnih rješenja interijera primjenom zidnih obloga od furnira. U radu se navode ciljevi projekta, osnovni pojmovi vezani uz drvene obloge, module, proporcije te analiza furnirskih ostataka i dimenzija učionica koja će služiti za razvoj konačne geometrije, oblikovanja i proporcija modula obloge.

*Ključne riječi: Spačva, zidna obloga, modul, drvo, furnir*

## **Abstract**

The paper describes a research project for innovative wood wall coverings development in Spačva d.o.o. company. Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek is project partner with the Research Group dealing with the development of aesthetic and design solutions for interiors using veneer wall coverings. The paper describes the project, the basic concepts of modules and proportions, and the analysis of veneer residues and classrooms, which will be used to develop the final dimensions, design and proportions of the module.

*Keywords: Spačva, Wall Covering, Module, Wood, Veneer*

## 1. Uvod

### 1.1. O projektu

Projektom „Istraživanje i razvoj inovativnih drvnih zidnih obloga, pregradnih i nosivih zidova za održivu gradnju u poduzeću Spačva d.d.“, ukupne vrijednosti 63.875.615,78 kuna, provode se znanstveno-istraživačke aktivnosti u svrhu razvoja inovativnih drvnih zidnih obloga, pregradnih i nosivih zidova za održivu gradnju stambenih i javnih objekata. Prijavitelj projekta je Drvena industrija SPAČVA d.d.<sup>1</sup>, a partneri su Fakultet šumarstva i drvnih tehnologija u Zagrebu te Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

Veliki dio proizvodnog asortimana Spačve d.d. odnosi se na proizvode niskoga stupnja dovršenosti (niske dodane vrijednosti) što ju svrstava u proizvođače poluproizvoda, umjesto u proizvođače finalnih proizvoda visoke dodane vrijednosti. Provedbom ovog projekta Spačva d.d. ima za cilj transformirati se u proizvođača finalnih proizvoda visoke dodane vrijednosti za domaće i inozemno tržište. Razvijena zidna obloga od furnira imat će funkciju oblaganja zidova te biti dio razvijenih modularnih pregradnih i nosivih zidova u interijeru drvenih građevina.

Projekt se provodi kroz pet projektnih elemenata/aktivnosti, a djelatnici Građevinskog i arhitektonskog fakulteta u Osijeku angažirani su u provedbi PE 1 i PE 5.

PE 1 „Razvoj sendviča/konstrukcije drvenih zidnih obloga, pregradnih i nosivih zidova“

PE 2 „Optimizacija tehnologije proizvodnje hrastovog furnira za drvene zidne obloge, pregradne i nosive zidove“

PE 3 „Procjena utjecaja životnog vijeka (LCA) masivnoga drvenog sendvič panela na okoliš“

PE 4 „Istraživanje toplinskih i akustičnih svojstava različitih drvnih materijala i sendviča/konstrukcija“

PE 5 „Razvoj estetsko-oblikovnih rješenja interijera primjenom zidnih obloga od furnira s različitim prirodnim pojavnostima s ciljem povećanja iskorištenja furnirskih trupaca“

U ovom radu predstaviti će se aktivnosti grupe PE 5.

---

<sup>1</sup> Spačva d.d. utemeljena je 1956. godine pod nazivom DIP Slavonski hrast

## 1.2. Aktivnost PE 5

Cilj aktivnosti PE 5 je ostvariti dodanu vrijednost furnira hrasta te iskoristiti (do sada nedovoljno iskorištene) hrastove trupce razvojem različitih oblikovno-estetskih rješenja koja će se nalaziti na vidljivim dijelovima dekorativnih panela. Aktivnost se provodi kroz više faza gdje se kroz analizu proizvodnog procesa i furnirskih ostataka, parametarskim modeliranjem provjeravaju mogućnosti oblikovanja novog materijala te se oblikuju konceptualna vizualno estetska rješenja novih dekora. Cilj je razviti tri tipska dekora s pod-dekorima koji će se primijeniti na novim zidnim oblogama i zidovima nakon čega će se ispitati mišljenja i stavovi korisnika o odabranim dekorima u prostoru metodom anketnog upitnika, razgovora i promatranja te izraditi informacijske digitalne modele novih proizvoda za primjenu u BIM konceptu.

## 2. Osnovni pojmovi

### 2.1. Furnir

Furnir je proizvod dobiven preradom drva, a označava tanki sloj drva najveće debljine 0,05-10 mm s kojim se može oblagati određena ploha ili komad namještaja. Dobiva se ljuštenjem, rezanjem ili piljenjem prethodno pripremljenih trupaca. [1]

### 2.2. Modul

Modul je najmanja samostalna jedinica obloge s jasno postavljenim karakteristikama (oblik, veličina i tekstura). Slaganjem modula u kompoziciju, nastaju različite cjeline koje su ovisne o pojedinačnom modulu, dok je modul neovisan o cjelini. Modularna struktura sastoji se od pojedinačnih i neodvojivih funkcionalnih elemenata sa standardiziranim karakteristikama, a može biti sastavljena od modula istih svojstava ili više različitih modula te slagana prema različitim kompozicijskim načelima ovisno o dimenzijama i mjerilu. [2]

### 2.3. Proporcije

Proporcija predstavlja mjerni odnos među dijelovima cjeline, ali i mjerni odnos dijela prema cjelini. [3] Proporcije se tako mogu zasnivati na različitim mjerama i oblicima kao što su kvadrat, krug ili trokut, ali i prema čvrstim pravilima proporcija poput zlatnog reza, modulora [3], aritmetičkog ili harmonijskog niza.

### 3. Analiza furnirskih ostataka i analiza učionica - rezultati

#### 3.1. Analiza furnirskih ostataka

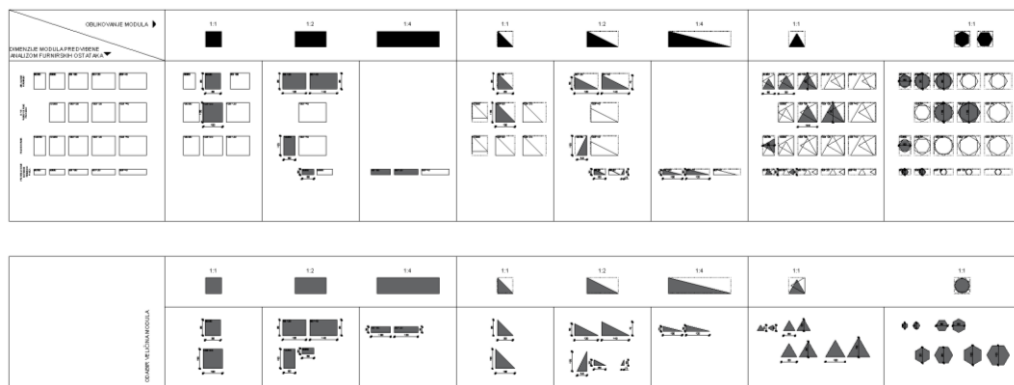
Boravkom u pogonu Spačve d.d. u Vinkovcima tijekom ožujka 2022. godine dobio se uvid u cjelokupan proces proizvodnje te mogućnosti iskorištavanja ostataka proizvoda (ostatak - naziv za drvenu masu koja će postati pelet). Sistematizirani su svi ostatci po vrstama i dimenzijama u više grupa te su dane mogućnosti slaganja u modul (Slika 1). Temeljem analiza furnirskih ostataka definirani su prijedlozi mogućih dimenzija modula:

1. modul koji bi se oblagao furnirima - jedna dimenzija <800mm, dok je druga varijabilna: 800x600mm, 800x800, 800x1000, 800x1200, 800x1400mm.
2. modul iz letve trokutastog presjeka - jedna dimenzija <1000mm, dok je druga varijabilna: 800x600mm, 1000x800, 1000x1000, 1000x1200, 1000x1400mm.
3. modul iz piljenog furnira - jedna dimenzija <1000mm, dok je druga varijabilna: 1000x600mm, 1000x800, 1000x1000, 1000x1200, 1000x1400mm.
4. modul iz ostataka prekrivanja dužinsko/širinskih ploča - jedna dimenzija <300mm, dok je druga varijabilna: 300x600mm, 300x800, 300x1000, 300x1200, 300x1400mm.

Temeljem predloženih dimenzija postavljeni su osnovni geometrijski likovi različitih proporcija i sistematizirane su konačne veličine i oblici modula (Slika 2.) – kvadrat, pravokutnik (1:1, 1:2, 1:4), pravokutni trokut (1:1, 1:2, 1:4), jednakostranični trokut (1:1) i jednakostranični šesterokut (1:1). Navedeni geometrijski likovi odabrani su radi mogućnosti modularnog slaganja i potpunog prekrivanja površine zida bez "ostataka – rupa". Takvi oblici omogućavaju efikasnu i ekonomičnu upotrebu materijala od kojega je modul izrađen.



**Slika 1.** Primjeri ostataka iz proizvodnje: 1) okrajci dužinsko širinske ploče, 2) letvice trokutastog presjeka, 3) rezani furnir – ljepljenje i prešanje, 4) i 5) piljeni furnir – ljepljenje i pletenje



**Slika 2.** Oblikovanje modula

### 3.2. Analiza učionica

Za potrebe razvoja modula analizirane su učionice osnovnih škola u Osijeku. Većina školskih zgrada sličnog je konstruktivnog sustava i arhitektonskog oblikovanja te slične prostorne organizacije školskog prostora i učionica [4]. Analizirane su površine i dimenzije učionica te dimenzije užeg i šireg zida učionice u 156 učionica iz 13 osnovnih škola.

Izdvojene su prosječne, minimalne, maksimalne i najčešće dimenzije, a za razvoj modula izdvojen je uži (stražnji) zid učionice. Na dimenziji stražnjeg zida preklapale su se odabrane dimenzije modula s dimenzijom zida. Veća je razlika u dimenzijama učionica vidljiva jedino kod škola izgrađenih još u 19. stoljeću, dok ostale veličine i dimenzije variraju do cca 50 cm po visini (pomak za cca 10 cm) ili do 100 cm po dužini zida. Najčešća dimenzija užeg, odnosno stražnjeg zida učionice je 630-650 cm širine i 300-330 cm visine. U Tablici 1. prikazani su rezultati analiza dimenzija učionica.

**Tablica 1.** Rezultati analiza dimenzija učionica

broj škola	19.st.		20.st.		prosjek		min.		max.		najčešća varijabla	
	2		11		ukupno:13							
broj uč.	31		125		156		2		20		6	
površina uč.	55.63		57.99		57.70		45.96		68.25		56.70	
dimenzije uč.	6.25	8.90	6.53	8.89	6.50	8.89	6.00	7.66	7.17	10.5	6.30	9.00
uži zid uč.	6.25	4.48	6.53	3.44	6.50	3.44	6.00	3.00	7.17	4.66	<b>6.30</b>	<b>3.00</b>
širi zid uč.	8.90	4.48	8.89	3.44	8.89	3.44	7.66	3.00	10.5	4.66	9.00	3.00

#### 4. Zaključak i nastavak istraživanja

S obzirom da je u radu opisan projekt u početnoj fazi, umjesto zaključka prikazani su daljnji koraci u njegovom provođenju. Temeljem analiza proizvodnih ostataka te analiza dimenzija zidova učionica, slijedi preklapanje predloženih modula obloge s dimenzijama učionica te uspoređivanje sa standardnim visinama zidova na kojima će se obloga primjenjivati. Nakon dobivene odgovarajuće veličine modula u odnosu na visinu zida (putem grafičke analize), izradit će se 3d model s teksturama i varijacijama veličina i oblika te provesti ispitivanje mišljenja i stavova korisnika o odabranim dekorima u prostoru metodom anketnog upitnika, razgovora i promatranja o dojamu prostora nakon čega će se donijeti odluka o konačnom obliku i dimenzijama modula drvene obloge.

#### Literatura

[1] <https://www.hrsume.hr/index.php/hr/ume/opcenito/sumrjecnik>, pristupljeno: 23.08.2022.

- [2] Elgård, P., Miller, Thomas D., Defining Modules, Modularity and Modularization: Evolution of the Concept in a Historical Perspective, Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Fuglsoe, Aalborg University, 1998.
- [3] Ugljen-Ademović, N.: Arhitektura i osnove arhitektonskog projektiranja, Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 2018.
- [4] Hadzima-Nyarko, M.; Ademović, N.; Krajnović, M.; Architectural characteristics and determination of load-bearing capacity as a key indicator for a strengthening of the primary school buildings: Case study Osijek // Structures, 34 (2021), 3996-4011 doi:10.1016/j.istruc.2021.09.105

# ODREĐIVANJE POLOŽAJA OBALNE LINIJE I PRORAČUN ŠIRINE PLAŽE NA TEMELJU VIDEO-NADZORNOG SUSTAVA- PRIMJER PLAŽE PLOČE U RIJECI

Determination of shoreline position and calculation of the beach width by a video monitoring system – the example of the Ploče beach in Rijeka

**Hanna Miličević<sup>1</sup>, Dalibor Carević<sup>2</sup>, Damjan Bujak<sup>3</sup>**

(1) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, hanna.milicevic@grad.unizg.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, dalibor.carevic@grad.unizg.hr

(3) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, damjan.bujak@grad.unizg.hr



## Sažetak

Informacije o promjeni položaja obalne linije su ključne za efikasno upravljanje obalom. Pouzdanom metodom za promatranje ponašanja plaže pri različitim vremenskim utjecajima u razdoblju u danima, mjesecima i godinama smatra se video nadzorni sustav. Priprema plaže za razdoblje turističke sezone često zahtjeva dodatno nasipavanje prirodne obalne linije šljunčanim materijalom. Obalnim inženjerima je od velike važnosti poznavati područja najintenzivnije erozije kako bi se nasipavanje izvršilo racionalno i bez nepotrebnih troškova. U ovom je radu na primjeru plaže Ploče u Rijeci predstavljen CoastSnap softverski paket koji osim detekcije položaja obalne linije omogućava i proračun širine plaže uzrokovane pronosom sedimenta. Najuočljiviji rezultati se javljaju poslije olujnih događaja, gdje se jasno razaznaju najosjetljivija mjesta u kojima dolazi do najvećih promjena.

*Ključne riječi: video-nadzorni sustav, erozija, plaža Ploče, pronos sedimenta, šljunčane plaže*

## Abstract

Information on shoreline changes is critical for effective coastal management. A video monitoring system is considered a reliable method to observe the behavior of the beach under different weather influences over a period of days, months, and years. Preparing the beach for the tourist season often requires additional nourishment of the natural shoreline with gravel material. It is of great importance for coastal engineers to know the areas with the most severe erosion so that the nourishment can be carried out rationally and without unnecessary costs. This paper presents the CoastSnap software package using the example of the Ploče beach in Rijeka, which, in addition to determining the shoreline, also allows the calculation of the beach width caused by sediment transport. The most noticeable results occur before and after storm events, and clearly show the most sensitive places where the greatest changes occur.

*Keywords: video-monitoring system, erosion, Ploče beach, sediment transport, gravel beaches*

## 1. Uvod

Predviđanje dugoročnih promjena položaja obalne linije jedan je od osnovnih zadataka obalnih znanstvenika i inženjera. Kako bi se pružio kvalitetniji rekreacijski sadržaj plaže, ili se proširio njen postojeći kapacitet, često se izvodi nasipavanje šljunčanim materijalom [1]. S obzirom na kompleksnost prirodnih karakteristika valova koji uzrokuju morfološku aktivnost obale u obliku erozije, proučavanje i procjena dugotrajnog ponašanja obale je nužna za očuvanje i iskoristivost plaže tijekom turističke sezone. Nasipavanje materijala zahtjeva velike troškove [2], te je potrebno predvidjeti najosjetljivije dijelove obale, tj. dijelove na kojim se javlja najintenzivniji utjecaj erozije u obliku smanjenja širine plaže. Jedna od najpraktičnijih tehnologija u zadnjih nekoliko desetljeća za procjenu prirodnih i antropogenih promjena obalne linije je video sustav [3]. U ovom radu predstaviti ćemo postupak proračuna širine/površine plaže uz pomoć detektiranih položaja obalne linije video nadzornim sustavom. U sljedećim poglavljima ukratko ćemo opisati korištenu metodu i dobivene rezultate.

## 2. Materijali i metode

Istraživanje je provedeno na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče, na sjeverozapadnom dijelu grada Rijeke, Kantridi (Slika 1). Plaža je izgrađena 2011. godine kao dio sportsko-rekreacijskog kompleksa, bazeni Kantrida [4]. Duljina plaže iznosi 320 m, te je 30 metarskim središnjim perom podijeljena na dvije cjeline, tj. na „zapadni“ i „istočni“ dio. U cilju praćenja promjena položaja obalne linije, koji je važan za određivanje mjesta najvećih promjena širine plaže uzrokovanih poprečnim pronosom sedimenta ugrađen je Argus sustav video-monitoringa plaže. Sustav se sastoji od dvije Blackfly S GigE kamere (BFS-PGE-122S6C-C) s rezolucijom od 4,096 x 3,000 piksela na visini od 13.8 m iznad srednje razine mora, sa ciljem omogućavanja kontinuiranih video snimki visoke rezolucije istočnog i zapadnog dijela plaže. Primjena ovakve metode omogućava nam dvije ključne stvari: 1) osrednjavanje niza fotografija u 10-minutnom intervalu za uočavanje brzih pojava na obali poput uspinjanja vala (eng.: wave run-up), odnosno spuštanja vala (eng.: wave run-down) kao i tzv. zapljuskivanje vala (eng.: wave swash) prilikom kojeg dolaze najintenzivnije promjene u poprečnom smjeru i 2) transformacija/rektifikacija tzv.

kosih slika u tlocrt obalnog područja, kako bi se kvantitativne informacije dobile u stvarnim koordinatama [3].

Pomoću video nadzornog sustava, u zimskom periodu od 30. rujna 2020. do 27. ožujka 2021., zbog veće prisutnosti razornih valova uzrokovanih olujama koji omogućavaju uočljivije promjene položaja obalne linije, prikupljeno je 69 fotografija zapadnog i 66 fotografija istočnog dijela plaže. Cilj prikupljanja niza fotografija je zapravo proračun promjene širine/površine i detekciju položaja najintenzivnijeg djelovanja erozije pomoću digitalne analize slike bez ikakvog terenskog mjerenja. Formula kojom je određena promjena površine plaže izgleda:

$$P_p = \sum_{i=1}^N \check{S}_p \cdot D_T \quad (1)$$

gdje  $P_p$  predstavlja površinu plaže,  $\check{S}_p$  širinu plaže,  $D_T$  duljinu plaže između presjeka (u našem slučaju 2 m) i  $N$  je broj presjeka.



**Slika 1.** Umjetna šljunčana plaža Ploče u Rijeci izgrađena 2011. godine

Postavljeno je ukupno 79 presjeka okomito duž obale s razmakom od 2 m na istočnom i zapadnom dijelu plaže (Slika 2.). Presjeci su postavljeni kao potreba softverskog paketa CoastSnap u programskom jeziku Matlab za poluautomatsko iscrtavanje položaja obalnih linija i proračun širine plaže. Za detaljnije objašnjenje algoritma spomenutog proračuna preporučuje se članak [5]. Za promatrani period dobiveno je ukupno 135 obalnih linija, za lakšu vizualizaciju prikazane su pomoću AutoCAD-a zajedno s maksimalnom (anvelopa prema kopnu) odnosno minimalnom (anvelopa prema moru) promjenom položaja obalne linije zbog utjecaja valova, olujnih događaja, pronosa sedimenta sl. (Slika 2.). U ovom radu prikazat ćemo promjenu širine plaže prije i poslije olujnog događaja u prosincu 2020. godine tijekom promatranog perioda istraživanja.



**Slika 2.** Okomito položeni presjeci uzduž obale (žute linije) i položaj promjene obalnih linija u razdoblju od 30.rujna 2020. do 27. ožujka 2021. (narandžaste linije)

### 3. Rezultati

Na slici 3. prikazane su promjene širine plaže na svakom presjeku, gdje se može uočiti da se najveće promjene događaju na zapadnoj obali između 5-og i 20-og presjeka, 25-og i 35-og presjeka, te 40 i 45 presjeka, gdje se primijeti pojava erozijskih procesa ali i povećanje širine plaže na određenim dijelovima. Za razliku od zapadnog dijela, duž čitave istočne strane obale javlja se erozija, gdje se vidi maksimalno smanjenje širine od 2.22 m uz središnje pero. S obzirom da se uz pomoć CoastSnap aplikacije može dobiti promjena širine plaže u promatranom periodu, koristeći formulu (1) može se odrediti i promjene površine plaže kao jedan od osnovnih parametara za prikaz potrebe dohranjivanja plaže u cilju povećanja kvalitete rekreacijskih usluga.

### 4. Zaključak

Nadziranje promjena na obali pomoću video nadzornog sustava pokazalo se kao vrlo uspješna i perspektivna metoda za praćenje morfodinamičkih procesa. Prednost ove metode, osim relativno malih troškova i pristupačnosti, je i mogućnost praćenja ponašanja obalne linije i prilikom loših vremenskih uvjeta, što je drugim metodama teško postići. Daljnjim istraživanjima želi se poboljšati točnost procjene položaja obalne linije korištenjem konvolucijskih neuronskih mreža, koje bi znatno smanjile vrijeme detekcije obalne linije, te poboljšale trenutni poluautomatski način koji zahtjeva i ručne korekcije.



**Slika 3.** Promjena širine zapadnog i istočnog dijela plaže poslije olujnog događaja u prosincu 2020. godine

## Literatura

- [1] Lončar G., Carević D., Ilić S., Krvavica N., Kalinić F.: "Morfofodinamika šljunčanog žala Ploče u uvjetima jakog juga," *Hrvatske vode*, 28(113), 2020, (205-216), Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/249870>.
- [2] Kalinić F., Lončar G.: "Morfofodinamika i održivost nasipane šljunčane plaže – primjer plaža Ploče u Rijeci, 6. Simpozij doktorskog studija građevinarstva: Zbornik radova, prof.dr.sc. Nina Šfirmer, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu-Građevinski fakultet Zagreb, (85-96), 2020., <https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2020.07>
- [3] Harley M.D., Andriolo U., Armaroli C., Ciavola P., "Shoreline rotation and response to nourishment of a gravel embayed beach using a low-cost video monitoring technique: San Michele-Sassi Neri, Central Italy," *Journal of Coastal Conservation*, 18(5), 2014, (551-565), doi: 10.1007/s11852-013-0292-x.
- [4] Tadić A, Ružić I., Krvavica N., Ilić S., "Post-nourishment changes of an artificial gravel pocket beach using UAV imagery " *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3):358, 2022, <https://doi.org/10.3390/jmse10030358>.
- [5] Harley M.D., Kinsela M.A., Sánchez-García E., Vos K., "Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images," *Coastal Engineering*, 150, 2019, (175-189), doi: 10.1016/j.coastaleng.2019.04.003.

# PROBLEMATIKA ODLUČIVANJA U UVJETIMA NEIZVJESNOSTI

## Addressing the Issue of Decision Making under Conditions of Uncertainty

**Dino Obradović<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, [dobradovic@gfos.hr](mailto:dobradovic@gfos.hr)

## Sažetak

Odlučivanje je problem koji se javlja svakodnevno u svim područjima života i rada. Donošenje odluka je u većini slučajeva složeno i teško budući da se donositelj odluke suočava sa situacijama kojima ne zna ishod ili ne zna sve moguće alternative. Odlučivanje je proces odabira nekog smjera djelovanja između više alternativa. Okolnosti u kojima odlučivanje može biti su uvjeti sigurnosti, uvjeti rizika i uvjeti nesigurnosti (neizvjesnosti). Situacija odlučivanja u uvjetima neizvjesnosti je najsloženija i najmanje poželjna od navedene tri situacije. Budući da u situacijama neizvjesnosti nije moguće jednoznačno definirati neki kriterij kojim se donositelji odluka mogu koristiti to postoji više kriterija. Tri kriterija koja će se prikazati u radu su: Waldov kriterij pesimizma, kriterij optimizma te Laplaceov kriterij racionalnosti. Ovisno o sklonostima donositeljima odluke moguće je koristiti navedene kriterije.

*Ključne riječi: kriteriji odlučivanja, odlučivanje, uvjeti neizvjesnosti*

## Abstract

Decision making is a challenge we get faced with every day in all the areas of our professional and personal life. In most cases, decision making is a complex and difficult process since the decision maker faces situations where he does not know the outcome or has not considered all the possible alternatives. Decision making is a process of selecting a direction to take among several different alternatives. The circumstances in which decision making can be performed are safety, risk and uncertainty conditions. The decision making process under conditions of uncertainty is the most complex and the least desirable of the three situations mentioned above. Since in situations of uncertainty it is not possible to establish unambiguously a specific criterion to be applied by decision makers, there are several different criteria used. The three criteria that will be presented in the paper are the following: Wald's criterion of pessimism, optimism criterion and Laplace's criterion of rationality. The said criteria may be used depending on the preferences of decision makers.

*Keywords: decision criteria, decision making, conditions of uncertainty*

## 1. Uvod

Donošenje odluka - odlučivanje je veoma težak zadatak i nitko ga nije lišen. Izborom između više mogućih rješenja dolazi se do jednostavnijih ili složenijih odluka [1]. Odlučivanje je proces utvrđivanja i odabiranja načina rješavanja nekoga problema u skladu s ciljevima organizacije i okolnostima u kojima ona djeluje [2] odnosno odabir nekog smjera djelovanja između više alternativa [3]. Svaka ljudska aktivnost posljedica je nekog ranijeg procesa odlučivanja ili je ona sama odlučivanje. Sve što se radi danas, u određenom trenutku odnosno sada ili je odlučivanje ili realizacija ranijeg procesa odlučivanja [4]. Donositelji odluka često se suočavaju s ozbiljnim nedostatkom informacija [5], a često se moraju donositi odluke u uvjetima nesigurnosti [6].

## 2. Okolnosti odlučivanja

### 2.1. Odlučivanje u uvjetima sigurnosti

Tu su svi parametri problema poznati [7]. Uvjeti sigurnosti postoje kada donositelj odluke s razumnom sigurnošću zna koje su alternative, koji su uvjeti povezani sa svakom alternativom i ishod svake alternative te su dostupne točne, mjerljive i pouzdane informacije na kojima se temelje odluke [8]. U uvjetima sigurnosti ishod je poznat 100 %, odnosno vjerojatnost iznosi 1 [9]. Primjeri uvjeta sigurnosti u građevinarstvu su relativno rijetki, ali npr. dimenzioniranje građevinskih elemenata i konstrukcija može se navesti kao vrsta odlučivanja u uvjetima sigurnosti.

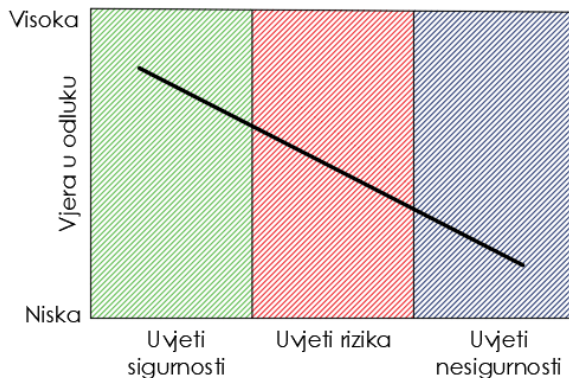
### 2.2. Odlučivanje u uvjetima rizika

Rizik je situacija u kojoj ishod neke odluke nije unaprijed poznat te postoji mogućnost negativnog utjecaja (štete, ozljede, gubitka) [9]. U situaciji rizika na objektivan je način utvrđena ili subjektivnom procjenom određena razdioba vjerojatnosti pojedinih rezultata razmatrane opcije odluke. Razdioba vjerojatnosti je poznata u slučaju događaja ili pojava koje su statistički mjerljive [10]. U građevinarstvu, često se javlja odlučivanje u uvjetima rizika. Primjer može biti odlučivanje investitora koju opciju ulaganja izabrati, rizik podcjenjivanja troškova i vremena gradnje i sl.



### 2.3. Odlučivanje u uvjetima nesigurnosti (neizvjesnosti)

Pojam „nesigurnosti“ znači da barem jedan parametar problema odlučivanja nije točno i u potpunosti poznat [7]. Bitna karakteristika neizvjesnosti je ograničenost znanja raspoloživog u trenutku odlučivanja [10]. Neizvjesnost je situacija u kojoj ishod neke odluke nije poznat, gdje nisu poznate vjerojatnosti očekivanih ishoda te se raspolaže s najmanje informacija za kvalitetno odlučivanje [10]. Situacija odlučivanja u uvjetima nesigurnosti je najnepoželjnija [4]. Na slici 1. prikazan je odnos između okolnosti u kojima se odlučuje i vjere u odluku.



**Slika 1.** Odnos između okolnosti u kojima se odlučuje i vjere u odluku (prema [4])

Kada se govori o građevinarstvu, samo neki od primjera nesigurnosti mogu biti promjena tečaja valute, štrajk, požari, potresi, poplave, rat, promjene politike i sl. Sve od navedenog nije moguće unaprijed znati, a znanje u trenutku odlučivanja je ograničeno.

## 3. Primjeri kriterija odlučivanja u uvjetima nezvjesnosti

### 3.1. Waldov kriterij pesimizma (max/min)

Prema ovom kriteriju donositelj odluke smatra da će se ostvariti najnepovoljnije okolnosti stoga je taj kriterij pesimistički ili konzervativan. Donositelj odluke bira najbolju alternativu pri najlošijem stanju [4], odnosno traži maksimum pri minimalnim dobitcima [10].

Primjer koji će se razmatrati u sva tri slučaja (tehnike odlučivanja) je sljedeći: Investitor na raspolaganju ima četiri projekta (A, B, C i D) pri tri scenarija. Projekt A je ulaganje u

gradnju stanova za prodaju, projekt B je otvaranje vlastitog građevinskog poduzeća, projekt C je stavljanje dostupnog novca na štednju, a projekt D je izgradnja restorana. Scenariji su P, R i O, redom pesimističko, realno i optimističko stanje okoline. Pesimističko stanje okoline javit će se u slučaju recesije gospodarstva. Realno stanje okoline će se pojaviti kada u gospodarstvu nema promjena – niti raste niti pada. Optimističko stanje okoline će biti u slučaju gospodarskog rasta.

Primjer je dan u tablici 1.

**Tablica 1.** Matrica dobitaka za Waldov kriterij pesimizma

Projekt	Scenariji			Min. dobitak
	P	R	O	
A	400	600	700	400 (max)
B	300	400	600	300
C	0	300	500	0
D	-300	100	800	-300

U ovom slučaju bira se projekt A budući da pri najlošijem scenariju donosi dobitak od 400 novčanih jedinica (NJ).

### 3.2. Kriterij optimizma (max/max)

Prema ovom kriteriju traži se najbolje rješenje od svake alternative i zatim se bira ono najbolje. Tu donositelj odluke bira najbolji potez pri najboljem stanju okoline i zato je ovaj kriterij optimistički kriterij [4]. Primjer je dan u tablici 2.

**Tablica 2.** Matrica dobitaka za kriterij optimizma

Projekt	Scenariji			Max. dobitak
	P	R	O	
A	400	600	700	700
B	300	400	600	600
C	0	300	500	500
D	-300	100	800	800 (max)

U ovom slučaju bira se projekt D budući da pri najboljem scenariju donosi dobitak od 800 NJ.

### 3.3. Laplaceov kriterij racionalnosti

U ovom kriteriju polazi se od pretpostavke da ako nema realne osnove za davanje prednosti nekom određenom scenariju u odnosu na drugi scenarij, onda je najbolje svim scenarijima dodijeliti podjednaku vjerojatnost događanja [4]. Budući da ima tri moguća scenarija, to se svaki dobitak u pojedinom projektu množi s 0,33 ( $0,33=1/3$ ). Prema prethodno navedenom, svakom ishodu od četiri projekta dana je mogućnost – vjerojatnost ostvarenja od 33 %.

Primjer je dan u tablici 3.

**Tablica 3.** Matrica dobitaka za kriterij racionalnosti

Projekt	Scenariji			Očekivana vrijednost dobitka
	P	R	O	
A	400	600	700	$400*0,33 + 600*0,33 + 700*0,33 = 561$ (max)
B	300	400	600	$300*0,33 + 400*0,33 + 600*0,33 = 429$
C	0	300	500	$0*0,33 + 300*0,33 + 500*0,33 = 264$
D	-300	100	800	$-300*0,33 + 100*0,33 + 800*0,33 = 198$

U ovom slučaju bira se projekt A budući da donosi očekivani dobitak od 561 NJ.

## 4. Zaključak

Odlučivanje je dio svakodnevnog privatnog i poslovnog života. Proces odlučivanja se može definirati kao odabir određene alternative (ili smjera djelovanja) između više mogućih alternativa. Postoji odlučivanje u uvjetima sigurnosti, rizika i neizvjesnosti (nesigurnosti). U građevinarstvu se javljaju različite okolnosti u kojima je potrebno donositi odluke, a najviše u uvjetima rizika i uvjetima nesigurnosti. U radu su kratko, na primjeru, prikazana tri kriterija odlučivanja u slučaju neizvjesnosti, te je prema preferencijama donositelja odluke, moguće odabrati bilo koji.

## Literatura

- [1] Budimir, M.: Uloga novih tehnologija u procesu odlučivanja. *Ekonomski vjesnik: Review of Contemporary Entrepreneurship, Business, and Economic Issues*, vol. XXVI, no. 2, 2013., str. 573-585.
- [2] Srića, V.: *Inventivni menadžer – putokazi za hrvatski gospodarski preporod*, CROMAN MEP CONSULT, Zagreb, 1995.
- [3] Wehrich, H., Koontz, H.: *Menadžment*, 10. izdanje, MATE d.o.o., Zagreb, 1998.
- [4] Sikavica, P., Bebek, B., Skoko, H., Tipurić, D.: *Poslovno odlučivanje*, 2. izmijenjeno i dopunjeno izdanje, Informator Zagreb, 1999.
- [5] Woodward, J. F.: *Certainty, Uncertainty, Probability, Variability and Risk*. In: *Quantitative Methods in Construction Management and Design*. Palgrave Macmillan, London, 1975. DOI: 10.1007/978-1-349-15579-8\_4
- [6] Sarkale, Y.: *Problems on decision making under uncertainty*, Doctoral dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2019.
- [7] Gaspars-Wieloch, H.: *On some analogies between one-criterion decision making under uncertainty and multi-criteria decision making under certainty*, *Economics and Business Review*, vol. 7, no. 2, 2021, str. 17-36. DOI: 10.18559/ebr.2021.2.3
- [8] Rawat, S.: *Decision-Making under Certainty, Risk and Uncertainty*. Dostupno na: <https://www.businessmanagementideas.com/decision-making/decision-making-under-certainty-risk-and-uncertainty/3371> (Pristupljeno: 28.06.2022.)
- [9] Karić, M.: *Uvod u menadžment rizika, bilješke s predavanja*, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Ekonomski fakultet u Osijeku, Osijek, 2011.
- [10] Karić, M.: *Analiza rizika*, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Ekonomski fakultet u Osijeku, Osijek, 2006.



# OBLAK TOČAKA I NURBS U IZRADI BIM ELEMENTA MODULA(RNE) ZIDNE OBLOGE

Point cloud and NURBS in modeling of a Wall  
Covering Module BIM element

**Nikolina Raguž-Lučić<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, nrl@gfos.hr

## Sažetak

U sklopu istraživačkog projekta razvoja inovativnih drvnih zidnih obloga u poduzeću Spačva d.d. provodi se razvoj estetsko-oblikovnih rješenja od furnira i ostataka u proizvodnji furnira. Cilj projekta jest razvoj inovativne drvene zidne obloge te inovativnog pregradnog i nosivog zida za održivu gradnju. U ovoj komponenti istraživanja planirana je metodologija laserskog skeniranja ostataka iz proizvodnje i transformacije podataka iz oblaka točaka u geometriju digitalnog modela. U radu se predstavlja pregled literature iz područja transformacije podataka, metodologija te pilot izrada modela ostatka iz proizvodnje piljenja trupaca u poduzeću Spačva d.d. Rezultati pilot istraživanja će se koristiti za unaprijeđenje metodologije skeniranja i transformacije podataka odabranih ostataka iz proizvodnje.

*Ključne riječi: drvene zidne obloge, NURBS, oblak točaka*

## Abstract

As part of the research project for the development of innovative wooden wall coverings in the company Spačva d.d. the development of aesthetic-shaped solutions from veneers and residues in the production of veneers is carried out. The goal of the project is the development of an innovative wooden wall covering and an innovative partition and load-bearing wall for sustainable construction. In this component of the research, the methodology of laser scanning of the remains from the production and transformation of the data from the point clouds into the geometry of the digital model is planned. The paper presents a literature review in the field of data transformation, methodology and pilot creation of a model of the residue from the production of sawing logs in the company Spačva d.d. The results of the pilot research will be used to improve the methodology of scanning and data transformation of selected production residues.

*Keywords: wooden wall coverings, NURBS, point cloud*

## 1. Uvod

Četvrta industrijska revolucija ili Industrija 4.0 predstavlja komercijalnu i proizvodnu praksu u poboljšanju utilizacije znanja i učinkovitosti (Newman, 2020.). Koncept označava trend prema digitalizaciji i automatizaciji proizvodnog okoliša, s potencijalom poboljšanja produktivnosti i kvalitete, no u građevinskoj industriji još uvijek nije zadobio dovoljnu pozornost (Oeserreich, Tauteberg, 2016). Istraživanja u području Industrija 4.0 predstavljaju relativno nov fenomen u kojemu prednjače razvijene zemlje s Njemačkom na čelu (Newman, 2020.). Osim ekonomskih doprinosa u poboljšanju produktivnosti, efikasnosti, kvalitete i suradnje, primjena tehnologija Industrije 4.0 može pomoći u povećanju sigurnosti, održivosti i tako dugoročno poboljšati postojeću lošu sliku građevinske industrije (Oeserreich i Tauteberg, 2016.). Implementacijom koncepta Industrija 4.0 u drvenu proizvodnju kroz modernizaciju, robotizaciju i digitalizaciju proizvodnog procesa osigurala bi se učinkovitija i kvalitetnija proizvodnja uz niže troškove. Oeserreich i Tauteberg (2016.) navode kako je BIM (Building Information Modelling) koncept centralna i jedna od najvažnijih tehnologija za digitalizaciju u građevinskom proizvodnom okruženju. Prvotno je koncept Industrije 4.0, počivao je na 9 stupova (Yang, Gu, 2021.): cyber-physical systems, Internet of Things (IoT), Big data, 3D printanje, robotika, simulacija, Augmented Reality (AR), cloud computing i cyber sigurnost. S vremenom su neki od spomenutih koncepata doživjeli određene izmjene, no svi oni omogućuju digitalizirano građevinsko okruženje. U implementaciji ovog koncepta prisutne su brojne barijere i poteškoće, a samu građevinsku industriju karakterizira izrazita sporost u prihvaćanju inovacija. U radu se predstavlja jedan od načina implementacije BIM pristupa u fazu koncipiranja proizvoda drvenih zidnih obloga. Rad obuhvaća pregled literature iz područja transformacije podataka te rezultate pilot izrade point cloud podataka za transformaciju u NURBS (NURBS – eng. non-uniform rational basis spline) ostatka iz proizvodnje piljenja trupaca u poduzeću Spačva d.d.

### 1.1. Istraživanje i razvoj inovativnih drvnih zidnih obloga, pregradnih i nosivih zidova za održivu gradnju u poduzeću Spačva d.d.

Tijekom 2020. godine prijavljen je projekt pod nazivom „Istraživanje i razvoj inovativnih drvnih zidnih obloga, pregradnih i nosivih zidova za održivu gradnju u poduzeću Spačva



d.d.“, na poziv Povećanje razvoja novih proizvoda i usluga koji proizlaze iz aktivnosti istraživanja i razvoja faza II. Cilj projekta je podići vrijednost finalnom proizvodu integracijom digitalnih rješenja i procesa te je u sklopu projektne faze PE 5 „Razvoj estetsko-oblikovnih rješenja interijera primjenom zidnih obloga od furnira s različitim prirodnim pojavnostima s ciljem povećanja iskorištenja furnirskih trupaca“ planirano izraditi informacijske digitalne modele razvijenih proizvoda za primjenu u BIM pristupu.

Building Information Modeling ili BIM predstavlja evoluciju CAD (computer-aided design) sustava (Barazzetti, 2015.). BIM predstavlja simulaciju i optimizaciju procesa planiranja i izgradnje građevina na osnovu sveobuhvatnih digitalnih modela. BIM podatkovna baza integrirana je u objekt pri čemu su elementi inteligentni objekti koji sadrže informacije integrirane u virtualnu geometriju. Prema Barazzettiju (2016.), takav 3D model predstavlja naprednu računalnu tehnologiju upravljanja informacijama koji služi automatskom generiranju nacрта, izvješća, analiza, simulacija rasporeda, toplinskih i konstrukcijskih simulacija, upravljanju postrojenjem i slično. Razlikujemo „as-designed“ BIM model generiran u projektanskoj fazi te „as-built“ BIM model koji nastaje preliminarnim snimanjem nekog, već postojećeg objekta.

## **2. Postupci izrade BIM elementa u građevinarstvu**

### **2.1. Postupak dobivanja oblaka točkaka**

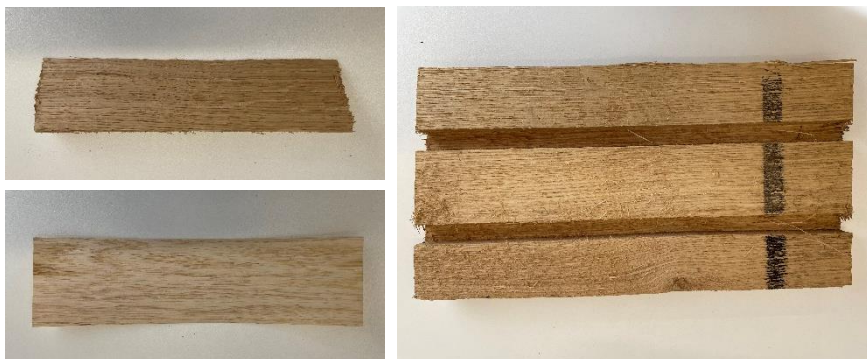
Izrada BIM modela postojećeg objekta započinje prikupljanjem metričkih informacija. Lasersko skeniranje uz fotogrametriju, predstavlja postupak dobivanja oblaka točkaka (eng. Point Cloud) koji metričkim informacijama definira stvarni i točan oblik istraživanog objekta (Barazzetti, 2016.). Riječ je o brzom i preciznoj metodi mjerenja koja može poduprijeti generiranje „as-built“ BIM-a. Lasersko skeniranje omogućava gusti oblak točkaka milimetarske preciznosti otkrivajući stvarni vanjski oblik konstruktivnog elementa. Oblak točkaka ne sadrži važne informacije u semantičkom pogledu, no predstavlja okosnicu i sirove podatke korisne za izradu modela baziranih na stvarnosti, NURBS-a i parametarskih modela. Velika količina podataka sadržana u oblaku točkaka zahtijeva naknadno upravljanje i njegovu simplifikaciju kako bi se moglo pristupiti izradi BIM modela. Zbog toga se pristupa pročišćavanju oblaka točkaka kako bi se kasnije stvorile visoko kvalitetne triangulacijske mreže.

## 2.2. Postupak transformacije oblaka točaka u NURBS

NURBS ili Non-Uniform Rational Basis Spline su matematičke funkcije s jasnom geometrijskom pojavnosti, a izračunavaju se numerički stabilnim algoritmima, dobivajući rezultate u stvarnom vremenu (Diara, Rinaudo, 2019.). Spomenute matematičke funkcije služe generiranju parametarskih „as-built“ objekata iz oblaka točaka, a baziraju se na NURBS krivuljama i NURBS površinama. NURBS krivulje su matematičke funkcije koje se mogu koristiti za rekonstrukciju standardnih oblika (linija, kružnica, parabola, itd.). NURBS površine su matematičke funkcije korištene uglavnom u CAD/CAM industriji za modeliranje jednostavnih i složenih oblika, a generiraju se iz NURBS krivulja u prostoru koje služe kao geometrijsko ograničenje za interpolaciju površina. NURBS površine su zapravo rekonstrukcija vanjske površine objekta dobivenog skeniranim oblakom točaka, no još uvijek bez parametarskih karakteristika. Prema Barazzetti-ju (2016.), nakon prikupljanja i registracije oblaka točaka potrebno je rekonstruirati linije diskontinuiteta, odnosno stvoriti mrežu NURBS krivulja, nakon čega slijedi generiranje NURBS površina.

## 3. Pilot istraživanje

Pilot istraživanje izrade parametarskog BIM modela započinje odabirom drvnih resursa koji su proizvodnom procesu tvrtke Spačva d.d. tehnološki višak ili ostatak, a predstavljaju sirovine visoke kvalitete (Slika 1). U svrhu dobivanja oblaka točaka, pristupit će se laserskom 3D skeniranju, pri čemu će se koristiti FARO Freestyle 3D skener (Slika 2).

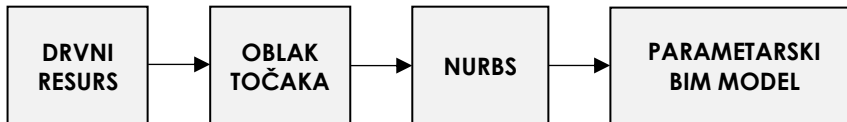


**Slika 1.** Odabrani drveni resursi za 3D skeniranje i pretvorbu u parametarski BIM model



**Slika 2.** FARO Freestyle 3D laserski skener

Odabrani, pročišćeni i simplificirani oblak točaka odnosi se samo na vanjski oblik i njegove specifičnosti te se pretvara u NURBS krivulje i površine, matematičke reprezentacije trodimenzionalne geometrije predmetnih resursa (Slika 3).



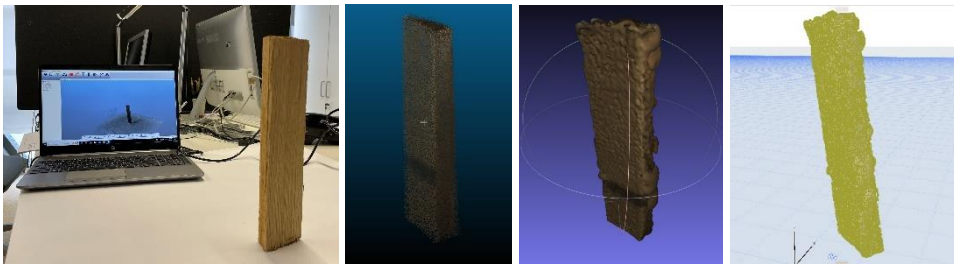
**Slika 3.** Shematski prikaz radnog tijeka od resursa do BIM modela

Dobivene modele karakterizira visoka razina detaljnosti, no oni se još uvijek ne mogu direktno umetnuti u željenu BIM platformu jer nije riječ o parametarski dinamičkim modelima. Kako bi se dobio parametarski BIM model, potrebno je pristupiti parametrizaciji NURBS modela te im dodijeliti semantička značenja.

## 4. Rezultati

Lasersko skeniranje provedeno je na odabranom jednostavnom drvenom ostatku u formi prizme s trokutnom bazom, približnih dimenzija 25x6,5 cm. Provedena su četiri zasebna laserska skeniranja, nakon čega se pristupilo obradi dobivenih podataka. Prvu fazu obrade predstavlja eksportiranje dobivenih skenova iz software-a Freestyle SCENE Capture u .E57 file, nakon čega slijedi pročišćavanje oblaka točaka svake pojedine

datoteke u software-u Cloud Compare. Kako bi se dobio završni oblak točaka, potrebno je pročišćene skenirane zasebne oblake točaka preklopiti odabirom minimalno triju referentnih točaka. Za potrebe pilot istraživanja preklopljene su tri od četiri datoteke oblaka točaka skeniranog elementa. Idući korak istraživanja predstavljala je obrada završnog oblaka točaka u software-u MeshLab 2022., pri čemu je oblak točaka pretvoren u 3D mrežni model te je eksportiran kao .STL format prikladan za daljnju obradu u Archicad BIM software-u.



**Slika 4.** Prikaz rezultata radnog tijeka od skeniranja resursa do modela u BIM-u

## 5. Rasprava i zaključak

Pilot istraživanjem provedenim na odabranom drvenom ostatku u tijeku rada od laserskog skeniranja do izrade njegove trodimenzionalne reprezentacije dostatne za daljnju obradu u BIM software-u utvrđeno je kako precizna obrada podataka u svakoj zasebnoj fazi ključna za dobivanje kvalitetnog 3D modela. Oblak točaka dobiven dostatnim brojem laserskih skeniranja te njegovo kasnije kvalitetno i precizno pročišćavanje preduvjet je za dobivanje optimaliziranog 3D modela u BIM software-u. Ova metodologija predstavlja potencijal za učinkovitije upravljanje ostacima iz proizvodnje, pri čemu se ostatak može definirati 3D modelom koji se koristi za procjenu mogućnosti njegove daljnje uporabe.

## Literatura

- [1] Newman, C., Edwards, D., Martek I., Lai J., Thwala W., Rillie I.: Industry 4.0 deployment in the construction industry: a bibliometric literature review and UB-based case study, *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(4), 2021, 557-580, 10.1108/SASBE-02-2020-0016

- [2] Oesterreich T., Teuteberg F.: Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of research agenda for the construction industry, 83, 2016, 121-139, 10.1016/j.compind.2016.09.006
- [3] Yang, F., Gu, S.: Industry 4.0, a revolution that requires technology and national strategies, *Complex & Intelligent Systems*, 7(3), 2021, 1311-1325, 10.1007/s40747-020-00267-9
- [4] Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana R., Previtali M.: Creation of Parametric BIM Objects from Point Clouds Using Nurbs, *The Photogrammetric Record*, 30(152), 2015, 339-362, 10.1111/phor.12122
- [5] Barazzetti, L.: Parametric as-built model generation of complex shapes from pointclouds, *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 2016, 298-311, 10.1016/j.aei.2016.03.005
- Diara, F., Rinaudo F.: From reality to parametric models of cultural heritage assets for HBIM, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Ávila, Spain, 413-419, 2019, 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-413-2019D

# PONAŠANJE U POŽARU NOSIVOG KOMPOZITNOG LAGANOG PANELA S GORIVIM TOPLINSKO- IZOLACIJSKIM SLOJEM

Fire behaviour of load-bearing light steel framed  
panel with flammable insulation

**Tomislav Ščapec<sup>1</sup>, Marija Jelčić Rukavina<sup>2</sup>**

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale,  
tomislav.scapec@grad.unizg.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale,  
marija.jelcic.rukavina@grad.unizg.hr

## Sažetak

Zbog sve veće potrebe za brzom i ekonomičnom gradnjom, sistemi od tankostijenih čeličnih profila često se koriste kao alternativa tradicionalnim sustavima gradnje u kojima dominiraju beton, mort i opeka. Osim veće brzine gradnje i smanjenih troškova, sistem pruža značajan broj prednosti poput smanjene težine bez gubitka nosivosti, mogućnosti recikliranja i ponovne uporabe. Nosiva konstrukcija izvedena je od hladno oblikovanih, čeličnih profila koji se pod utjecajem visokih temperatura deformiraju i uzrokuju smanjenje mehaničke otpornosti konstrukcijskog elementa. Iz tog razloga, ponašanje u požaru takvih sustava je često predmet istraživanja te će se u ovom radu predstaviti preliminarni rezultati eksperimentalnog ispitivanja te numeričke analize razvoja temperature u novom kompozitnom panelu s integriranom konstrukcijom koji se istražuje u sklopu KLIK projekta na Građevinskom fakultetu u Zagrebu.

*Ključne riječi: otpornost na požar, numerička analiza, modeliranje, tankostijeni paneli*

## Abstract

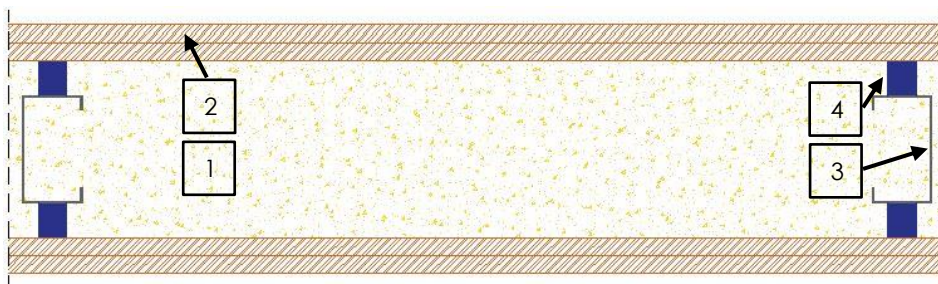
Due to the increasing need for fast and economical construction, light steel framed systems are often used as an alternative to traditional construction systems dominated by concrete, mortar and brick. In addition to faster construction speed and lower cost, the system offers a number of advantages, including reduced weight without loss of load-bearing capacity, the possibility of recycling and reuse. The load-bearing structure is made of cold-formed steel profiles that deform under high temperatures, causing a reduction in the mechanical strength. For this reason, fire performance of such systems is often the subject of research, and this paper presents the preliminary results of the numerical analysis of the temperature development in a new composite panel with integrated structure, which is being studied within the KLIK project at the Faculty of Civil Engineering in Zagreb.

*Keywords: fire resistance, numerical analysis, modelling, LSF panels*

## 1. Uvod

Osnovna konstrukcija panelnih sistema izvedena je od hladno oblikovanih čeličnih profila, gips kartonskih ploča i mineralne vune koja ispunjava unutrašnjost sistema [1]. Mineralna vuna se najviše koristi jer je materijal negoriv i pruža dobra zvučno-izolacijska svojstva, dok su gips-kartonske ploče poznat oblik pasivne zaštite od požara. Osim gips kartonskih ploča koriste se i druge vrste obložnih ploča poput magnezij oksidnih, magnezij sulfatnih, kalcij silikatnih, perlitnih i OSB ploča [1]–[3].

Iako je mineralna vuna negoriva, drugi izolacijski materijali, uglavnom polimerni materijali, imaju manju toplinsku vodljivost i manju vodopropusnost čime se mogu postići potencijalno bolja toplinska svojstva na sobnim temperaturama [4]. S druge strane, zapaljivost polimernih izolacijskih materijala predstavlja problem, a njihovo ponašanje u tankostijanim sustavima i otpornost na požar takvih sistema nije istražena. Stoga se u okviru istraživačkog projekta KLIK PANEL, na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu provodi istraživanje novog panelnog sustava koji se sastoji od čeličnih profila, ekspanzirajuće polimerne pjene (PUR) i Fermacell ploča kako je prikazano na slici 1. Čelični profili su od obložnih ploča dodatno odvojeni distancerima kako bi se umanjio utjecaj toplinskih mostova koji nastaju zbog direktnog kontakta čelika i obloge. Takav sustav potencijalno ima bolja toplinska svojstva na sobnim temperaturama od sličnih sistema izvedenih od mineralne vune i običnih gips-kartonskih ploča.



**Slika 1.** Novi kompozitni panel (1-PUR; 2-obloga; 3-čelik; 4-distancer)



## 2. Otpornost na požar kompozitnog panela

Ocjena otpornosti na požar mjeri se u minutama na temelju tri kritične kategorije: mehanička otpornost (R), izolacija (I) i cjelovitost (E) [5] prema normi HRN EN 1363-1:2020 i HRN EN 1365-2:2015 [6], [7].

Ukupna dimenzija uzorka iznosila je 2800 x 2995 mm. Ispitivanje je završeno u 51. minuti kada se polimerna ispuna zapalila. Uzrok zapaljenja pjene je u pucanju i otpadanju dijelova ploče koji su izložili ispunu direktnom plamenu. Na slici 2 prikazane su pukotine i razlomljeni dijelovi ploče orijentirane prema peći.



**Slika 2.** Pukotine i odlomljeni dijelovi vanjske obložne ploče tijekom izlaganja visokoj temperaturi

## 3. Numerička analiza razvoja temperature kroz panel

Za potrebe numeričke analize razvoja temperature potrebno je odrediti toplinska svojstva (specifični toplinski kapacitet, toplinska vodljivost i promjena gustoće) pojedinih komponenata na visokim temperaturama. Podaci potrebni za modeliranje uzeti su iz literature [1], [3], [8], a za Fermacell ploče uzete su vrijednosti gips kartonskih ploča. Model je izrađen u računalnom paketu Abaqus CAE gdje je opterećenje na izloženoj strani definirano izrazom:

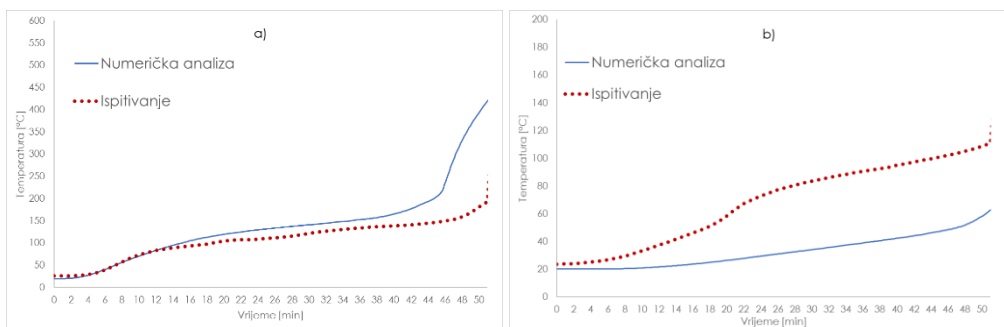
$$q = h(T_g - T_s) + \sigma \varepsilon (T_g^4 - T_s^4) \quad (1)$$

gdje je:  $q$  ukupni toplinski tok,  $\varepsilon$  relativna emisivnost,  $\sigma$  Stefan–Boltzmannova konstanta ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{C}^4$ ),  $T_g$  je temperatura peći koja prati ISO 834 krivulju, a  $T_s$  je površinska

temperatura uzorka. Zbog jednostavnosti, kreiran je dvodimenzionalni model razvoja topline.

## 4. Rezultati

Na slici 3 a i b prikazane su razvijene temperature dobivene tijekom ispitivanja te numeričke analize. Za vrijeme ispitivanja temperature su mjerene na sučelju pjene i ploča te na čeliku. Smatra se kako je kritična temperatura na kojoj se PUR zapali oko 350 °C [9]. Očitana temperatura na sučelju ploče i pjene u numeričkoj analizi manja je od predviđene temperature zapaljenja što je u skladu sa ispitivanjem panela na otpornost na požar.



**Slika 3.** Rezultati ispitivanja i numeričkih analiza: a) sučelje pjene i obložne ploče; b) čelični element

Kao zamjena za Fermacell ploču korištena su svojstva gips kartonskih ploča i vidljiva su određena odstupanja od eksperimentalno dobivenih vrijednosti, što upućuje na potrebu određivanja točnih toplinskih svojstava materijala. Također potrebno je odrediti toplinska svojstva polimerne pjene.

## 5. Zaključak

U ovom radu prikazani su preliminarni rezultati ispitivanja kompozitnog panela na otpornost na požar i prateće numeričke analize. Eksperimentalnim ispitivanjem zabilježeno je otkazivanje u 51. minuti zbog zapaljenja polimerne ispune. Za preciznije numeričke analize potrebna su veća saznanja o toplinskim svojstvima komponenata što će biti tema daljnjih istraživanja u projektu i doktoratu.

## Zahvala

Ovaj rad je dio IRI projekta „Kompozitni lagani panel s integriranom nosivom konstrukcijom, KLIK“ (KK. 01.1.1.07.0060), financiranog od strane Europske Unije operativnog programa Konkurentnost i kohezija.

## Literatura

- [1] N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J. J. Costa, and L. Simões da Silva, "Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78., 2017, 194–209, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.066.
- [2] S. Gnanachelvam, M. Mahendran, and A. Ariyanayagam, "Elevated temperature thermal properties of advanced materials used in LSF systems," *Fire Mater.*, p. fam.2943, Jan. 2021, doi: 10.1002/fam.2943.
- [3] E. Steau and M. Mahendran, "Elevated temperature thermal properties of fire protective boards and insulation materials for light steel frame systems," *J. Build. Eng.*, vol. 43, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102571.
- [4] J. Le Dréau, R. L. Jensen, and K. Kolding, "Thermal behaviour of a gypsum fibre board associated with rigid polyurethane foam under standard fire conditions," *Energy Procedia*, 2736–2741, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.615.
- [5] A. D. Ariyanayagam and M. Mahendran, "Numerical modelling of load bearing light gauge steel frame wall systems exposed to realistic design fires," *Thin-Walled Struct.*, vol. 78, 2014, 148–170, 2014, doi: 10.1016/j.tws.2014.01.003.
- [6] Hrvatski zavod za norme, Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata – 1. dio: Zidovi (EN 1365-1:2012). Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2012, p. 25.
- [7] Hrvatski zavod za norme, Ispitivanja otpornosti na požar – 1. dio: Opći zahtjevi (EN 1363-1:2020). Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2020, p. 65.
- [8] T. Ščapec and M. Jelčić Rukavina, "Review of thermal performance of LSF walls used for nZEB: Influence of components," 7th Symposium on Doctoral Studies in Civil Engineering, 107–121, 2021, doi: .
- [9] A. W. Giunta d'Albani, L. L. de Kluiver, A. C. J. de Korte, R. A. P. van Herpen, R. Weewer, and H. J. H. Brouwers, "Mass loss and flammability of insulation materials used in sandwich panels during the pre-flashover phase of fire," *Fire Mater.*, vol. 41, no. 6, pp. 779–796, 2017, doi: 10.1002/fam.2418.

# ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ SAMOZBIJAJUĆEG BETONA I BETONA ZA 3D PRINTER S DODATKOM BIOPEPELA

Research and development of SCC and 3D  
print concrete with biomass ash

**Luka Virovkić<sup>1</sup>, Damir Varevac<sup>2</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, lvirovkic@gfos.hr

(2) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, dvarevac@gfos.hr

## Sažetak

Biopepeo u građevinarstvu pokazuje velik potencijal i široku mogućnost primjene. Briga za okoliš i rastuća cijena fosilnih goriva dovode do povećanja potražnje za obnovljivim izvorima energije i uporabe otpadnih materijala među kojima je i pepeo biomase.

U prvoj fazi istraživanja napravljeno je laboratorijsko ispitivanje materijala (cementa, pepela, agregata) predviđenih za izradu mješavina i izrađene su betonske mješavine, te je ispitan utjecaj pepela biomase iz lokalne drvne industrije na svojstva betona u svježem i očvrslom stanju u odnosu na referentnu betonsku mješavinu spravljenju s miješanim portland cementom.

Druga faza uključuje rad s 3D printerom. Printer proizvođača COBOD BOD 2 je naručen i čeka se isporuka. U planu je napraviti konstrukcijske elemente (stup, greda, ploča, zid) te spremnik tekućina pravilnih i nepravilnih oblika.

*Ključne riječi: beton za 3D printer, samozbijajući beton, biopepeo*

## Abstract

Biomass ash shows a wide range of potential applications in civil engineering. Environmental protection and the rising price of fossil fuels result in rising demand for energy from renewable sources and recycled waste materials including biomass ash.

In phase 1 laboratory testing of materials (cement, biomass ash, aggregate) and concrete mixtures were made to determine the influence of biomass ash from local industry on the properties of concrete in both fresh and hardened condition. Results were compared with concrete made with mixed portland cement.

Phase two includes work with a 3D printer. 3D printer COBOD BOD 2 is ordered and a plan is to print construction elements (column, beam, plate, wall) as well as liquid containers in regular and irregular shapes.

*Keywords: 3D print concrete, self compacting concrete, biomass ash*

## 1. Uvod

Drvo se smatra ugljično neutralnim izvorom energije jer tijekom životnog vijeka apsorbira približno istu količinu ugljikovog dioksida koju oslobađa izgaranjem, stoga postoji trend porasta primjene drvene biomase kao obnovljivog izvora energije. To izravno utječe i na porast količine otpadnog pepela koji je potrebno zbrinuti na odgovarajući način. Građevinari pronalaze rješenja i pepeo koriste u cestogradnji [1], za poboljšanje tla [2], u cementnoj industriji, ugrađuju u beton [3], itd. Tako se dobiva ekološki prihvatljiv beton jer cementna industrija ima velik utjecaj na okoliš zbog potrebne velike količine energije i korištenja velike količine prirodnih resursa u proizvodnji cementa. Dakle potencijal primjene pepela u građevinarstvu je velik zbog smanjenja količine pepela koji je potrebno deponirati, ali i zbog mogućih ušteda na drugim materijalima [4],[5]. Cilj istraživanja je utvrditi utjecaj pepela biomase iz lokalne drvene industrije na svojstva betona u svježem i očvrslulom stanju u odnosu na referentnu betonsku mješavinu spravljenju s miješanim portland cementom.

### 1.1. Samozbijajući beton

U prvoj fazi istraživanja napravljeno je laboratorijsko ispitivanje i karakterizacija materijala (cementa, biopepela, agregata) predviđenih za izradu mješavina samozbijajućeg betona i izrađeno je ukupno 10 betonskih mješavina prema europskim smjernicama za samozbijajući beton [6]. U tablici 1. prikazan je sastav referentne mješavine bez pepela oznake SCC-R. Ostale mješavine sadrže 5, 10 i 15 % zamjene masene cementa pepelom i imaju oznake SCC-5FA, SCC-10FA i SCC-15FA gdje je SCC oznaka za samozbijajući beton, a FA za leteći pepeo. Ispitani su pepeli iz tri postrojenja: *Slavonija OIE* (FA1) iz Slavenskog Broda, *Spin Valis* (FA2) iz Požege i *Strizivojna* (FA3) iz Strizivojne.

Za vezivo je korišten cement CEM II/A-M (S-V) 42,5N, portland cement sa 6-20 % miješanog dodatka zgure i letećeg pepela i normalnim prirastom rane čvrstoće proizvođača *Nexe d.d.* iz Našica.

Agregat je dolomitni agregat frakcija 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm i punilo (dolomitno brašno), sve proizvođača *Velički kamen d.o.o.* iz kamenoloma Veličanka, te riječni pijesak frakcije 0-1 mm proizvođača *Romić d.o.o.* iz Virovitice.

Dodatak korišten je Sika Viscocrete® 4135 - superplastifikator za visokokvalitetne betone.

**Tablica 1.** Sastav referentne mješavine samozbijajućeg betona SCC-R

SCC-R	masa [kg]	gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]	volumen [dm <sup>3</sup> ]
Cement	380	3,01	126,25
Pepeo	0		0
Voda	171	1	171
Dodaci	6,65	1,08	6,16
Zrak	0,015	0,001	15
Punilo	100	2,97	33,67
0-1	334,33	2,58	129,59
0-4	632,70	2,79	226,77
4-8	373,21	2,88	129,59
8-16	466,51	2,88	161,98
UKUPNO	2464,4		1000

### 1.1.1.Svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju

Ispitivanje betonskih mješavina samozbijajućeg betona u svježem stanju provedeno je određivanjem viskoznosti mješavina, sposobnosti tečenja i sposobnosti zaobilaženja zapreka (pomoću J-prstena i L-kutije) (slika 1.). Kod određivanja karakteristika u svježem stanju mješavine koje nisu zadovoljile tražene kriterije modificirane su povećanjem vodocementnog omjera i količine dodatka tako da se dobije traženi razred.

Sve mješavine koje su zadovoljile prva dva kriterija (tražene razrede viskoznosti i sposobnosti tečenja), također zadovoljavaju kriterij sposobnosti zaobilaženja zapreka.

Mješavina s 15 % pepela Slavonija je neugradiva unatoč dodatku maksimalne količine superplastifikatora od 2,5 % i najvećeg vodocementnog omjera 0,60.



**Slika 1.** Aparatura za ispitivanje sposobnosti zaobilaženja zapreka betona:  
J-prsten (lijevo) i L-kutija (desno)

### 1.1.2.Svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

Ispitivanje tlačne čvrstoće predviđeno je nakon 7, 28 i 90 dana prema normi HRN EN 12390-3:2009 [8] na valjcima promjera 15 cm i visine 30 cm. U tablici 2. izlistani su rezultati tlačne čvrstoće uzoraka nakon 7, 28 i 90 dana. Uzorci su raskalupljeni nakon 24 - 48 sati zbog toga što pepeo usporava vezanje i njegovani u vodi do termina ispitivanja. Dodatak pepela u betonskim mješavinama rezultira smanjenom ranom tlačnom čvrstoćom. Nakon 7 dana referentna mješavina (bez pepela) ima najveću tlačnu čvrstoću, dok su uzorci s dodatkom pepela ostvarili prosječno 68 % tlačne čvrstoće referentne mješavine (stupac 1 tablice 2.). Uzorci stari 28 dana pokazuju dodatni porast tlačne čvrstoće, a gotovo svi uzorci s dodatkom pepela približili su se rezultatima tlačne čvrstoće uzorku SCC-R prosječno na 85 % (stupac 2 tablice 2.). Na kraju ispitivanja 90. dan najveću tlačnu čvrstoću pokazuje mješavina s 10 % zamjene cementa pepelom iz postrojenja Spin Valis postigavši time 111 % čvrstoće referentne betonske mješavine. Taj efekt povećanja čvrstoće kroz vrijeme betonskih mješavina s dodatkom pepela potvrđen je i kod drugih autora [5], [7], a može se pripisati pucolanskim reakcijama pepela koja se odvija nakon hidratacije cementa. Također iz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće vidi se da zamjena cementa pepelom do određene količine (do 10 %) ima pozitivan utjecaj na čvrstoću betona, dok daljnjim povećanjem udjela zamjene čvrstoća počinje opadati (uzorci s 15 % pepela).

**Tablica 2.** Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona

	TLAČNA ČVRSTOĆA [N/mm <sup>2</sup> ]		
	7 dan	28 dan	90 dan
SCC-R	31,68	36,92	45,96
SCC-5FA-1	24,33	33,34	39,35
SCC-10FA-1	20,70	28,08	34,30
SCC-15FA-1	-	-	-
SCC-5FA-2	21,99	34,83	41,97
SCC-10FA-2	28,65	36,02	50,84
SCC-15FA-2	21,13	32,10	38,87
SCC-5FA-3	18,21	25,63	36,57
SCC-10FA-3	21,99	36,86	43,07
SCC-15FA-3	16,68	25,13	31,54



## 1.2. Beton za 3D printer

3D printani beton je budućnost proizvodnje betona [9].

U sklopu ovog istraživanja 3D printer proizvođača COBOD BOD2 je naručen i čeka se njegova isporuka. U planu je izrada konstrukcijskih elemenata korištenjem 3D printera (zid, stup, greda, ploča) pravilnih i nepravilnih oblika, te spremnika tekućine koji će morati imati zadovoljen zahtjev vodonepropusnosti.

U laboratoriju je odrađen eksperimentalni dio vezan za dobivanje recepture morta za 3D ispis. Tražene su različite konzistencije, kao i vremena početka i kraja vezanja, a zatim su istiskivanjem morta simulirani uvjeti 3D printera kao na slici 2.



**Slika 2.** Istiskivanje morta i simuliranje uvjeta 3D printera

## 3. Zaključak

Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju pokazuju kako dodatak pepela kao zamjene za dio cementa povećava potrebnu količinu vode i dodatka u mješavinama. U očvrslom stanju dodatak pepela rezultira nižim ranim čvrstoćama u usporedbi s referentnom betonskom mješavinom, dok su se kasnije čvrstoće (nakon 28 i 90 dana) približile čvrstoći referentne mješavine. Najboljom se pokazala mješavina s 10 % zamjene cementa pepelom iz postrojenja Spin Valis. Uz jednako dobre rezultate u svježem stanju postignuti su najbolji rezultati u očvrslom stanju s većom tlačnom čvrstoćom od referentne mješavine. Rad s 3D printerom tek predstoji, ali iz preliminarnih mješavina morta

variranjem udjela cementa, agregata, pepela, ubrzivača vezanja i vode dobivena je receptura koja će vremenom vezanja odgovarati zahtjevima naručenog 3D printera.

## Zahvala

Autori zahvaljuju na potpori istraživanju koje financira Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja i HAMAG-BICRO kroz projekt: „Istraživanje i razvoj samozbijajućeg betona i betona za 3D printer s dodatkom biopepela“.

## Literatura

- [1] Zagvozda, M., Dimter, S., Rukavina, T., Grubeša, I. N. (2018). Possibilities of bioash application in road building, GRAĐEVINAR, 70 (5), 393-402, doi:<https://doi.org/10.14256/JCE.2074.2017>
- [2] Lebo, Ž., Wurth, D. Primjena letećeg pepela kao dodatka betonu i tlu, Croatian Builders Convention 2016 – Proceeding, Lakušić S. (ur.), Zagreb: Croatian Society of Civil Engineers, 2016, pp. 155-165, ISBN: 978-953-6686-18-6
- [3] Oner, A. et al. An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete, Cement and Concrete Research 35 (2005) publisher Elsevier Ltd. (1165–1171), 2005. doi:10.1016/j.cemconres.2004.09.031
- [4] Carević, I., Banjad Pečur, I., Štrimer, N., Milovanović, B. et. al.: Biomass ash potential and its status in Croatia, Croatian Builders Convention 2016 – Proceeding, Lakušić S. (ur.), Zagreb: Croatian Society of Civil Engineers, 2016, pp. 133-142, ISBN: 978-953-6686-18-6
- [5] Vujica, M., Skazlić, M. (2012). Samozbijajući ekološki prihvatljivi betoni, GRAĐEVINAR, 64 (11), 905-913, doi:<https://doi.org/10.14256/JCE.803.2012>
- [6] The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, International Bureau for Precast Concrete (BIBM), 2005
- [7] Nath P., Sarker P.: Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete, The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Heung Fai Lam, Hong Kong, Published by Elsevier Ltd., (1149-1156), 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.144
- [8] HRN EN 12390-3:2009: Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens
- [9] Bjegović D., Štrimer N., Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2015, ISBN: 978-953-6272-77-8



# UTJECAJ RAZLIČITIH NANOMATERIJALA U GLINENIM KOMPOZITIMA NA PRODOR ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA

Influence of different nanomaterials in clay  
composites on electromagnetic radiation  
penetration

**Ivan Vrdoljak<sup>1</sup>, Ivana Miličević<sup>1</sup>, Slavko Rupčić<sup>2</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i Arhitektonski fakultet  
Osijek, ivrdoljak@gfos.hr, imilicevic@gfos.hr

(2) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i  
informatičkih tehnologija, slavko.rupcic@ferit.hr

## Sažetak

U istraživanju glineni kompoziti su podvrgnuti mjerenju elektromagnetske transmisije na frekvencijama u području neionizirajućeg zračenja. Uzorci su izrađeni djelomičnom zamjenom gline s različitim dodatcima u iznosu 5 % na masu gline. Korišteni dodatci su: leteći pepeo, cink ferit, četiri različite vrste titanijevog dioksida, maghemit i antimon kositar oksid. Najveće umanjenje transmisije u odnosu na referentni uzorak zabilježen je za glinene uzorke s dodatkom antimon kositar oksida i titanijevog dioksida.

*Gljučne riječi: nanomaterijali, elektromagnetsko zračenje, elektromagnetska transmisija*

## Abstract

In this study, clay composites were subjected to measurements of electromagnetic transmission at frequencies in the region of non-ionizing radiation. The samples were made by partial replacement of clay with various additions in the amount of 5% by weight of clay. The additives used are: fly ash, zinc ferrite, 4 different types of titanium dioxide, maghemite and antimony tin oxide. The largest reduction in transmission compared to the reference sample was recorded for clay samples with antimony tin oxide and titanium dioxide.

*Key words: nanomaterials, electromagnetic radiation, electromagnetic transmission*

## 1. Uvod

Učinci dugotrajnog izlaganja neionizirajućem zračenju na zdravlje još nisu u potpunosti definirani. Mišljenje znanstvenika o štetnosti dugotrajnog izlaganja ovoj vrsti elektromagnetskog (EM) zračenja na ljudsko zdravlje podijeljeno je i često suprotstavljeno. Prema izvješću Bioinicative iz 2012., između 2007. i 2012. objavljeno je oko 1800 studija koje su izvijestile o različitim učincima na zdravlje ljudi uslijed izlaganja nižim frekvencijama neionizirajućeg EM zračenja [1]. Zbog potencijalnih zdravstvenih rizika, Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) i IARC (Međunarodna agencija za istraživanje raka) su 2011. godine klasificirali radiofrekvenciju (od 20 kHz do oko 300 GHz) kao potencijalno kancerogene za ljude [2]. U ovom radu istražuje se učinkovitost elektromagnetske zaštite glinenih kompozita u frekvencijskom području od 1,5 GHz – 6,0 GHz. Na ovim se frekvencijama može pronaći elektromagnetsko zračenje sustava mobilne telefonije: LTE 1800 (1,80 – 1,88 GHz), LTE 2100 (2,11 – 2,17 GHz), LTE 2600 (2,62 – 2,69 GHz) i 33, NR4500 GHz. Primejse koje su korištene kao dodatak glini su: leteći pepeo, cink ferit ( $ZnFe_2O_4$ ), četiri različite vrste titanijevog dioksida ( $TiO_2$ ), maghemit ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) i antimon kositar oksid (ATO). Leteći pepeo, cink ferit, titanijev dioksid i maghemit su se pokazali kao učinkoviti dodatci za zaštitu od EM zračenja u betonu, dok se antimon kositar oksid pokazao kao dobar prilikom korištenja u premazima [3], [4].

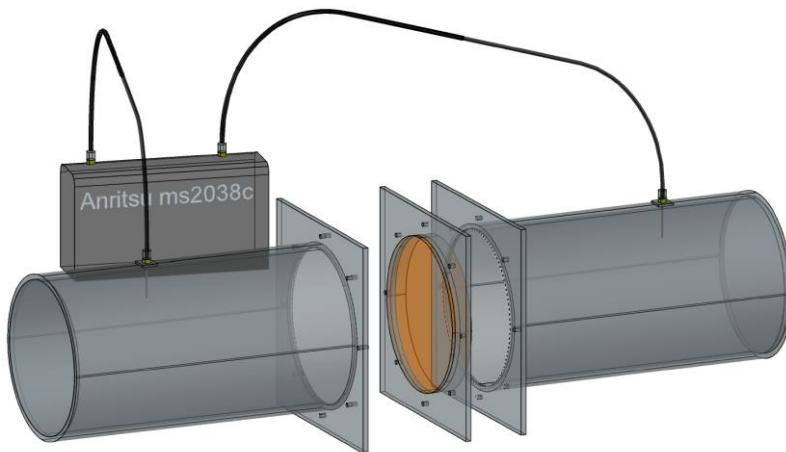
## 2. Eksperimentalni dio

### 2.1. Materijali

Sirova glina dobavljena je iz lokalne tvornice. Kako bi se osigurala valjanost rezultata, za svaku smjesu napravljena su 3 uzorka. Svaki uzorak sadržavao je 618 g gline i 32 g dodatka. Promjer uzorka glinenog cilindra korištenog za mjerenje EM zaštite bio je 150 mm, a debljina 20 mm. Kako bi se postigao jednak pritisak kalupa za svaki uzorak, oblikovani su pomoću modificiranog proctora. Materijali koji su korišteni kao dodatci u glini su: : letećem pepelu, cinkovom feritu ( $ZnFe_2O_4$ ), četiri različite vrste titanovog dioksida ( $TiO_2$ ), maghemitu ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) i antimon kositrenom oksidu (ATO). Navedeni dodatci su koristili kao zamjena glini u iznosu od 5 % na masu gline. Glineni kompoziti pečeni su na temperaturi od 850 °C u električnoj peći.

## 2.2. Metode ispitivanja

Prijenos elektromagnetskog zračenja mjereno je pomoću Anritsu ms2038c - ručnog vektorskog mrežnog analizatora i spektralnog analizatora. Raspon testnih frekvencija bio je 1,5 GHz – 6,0 GHz. Pomoću Anritsu ms2038c S parametara izmjerena je učinkovitost zaštite i koeficijenti apsorpcije-refleksije uzoraka s primjesama. Također je mjereno referentni uzorak (bez dodatka primjesa). Mjerni uređaj je sadržavao 2 aluminijska kružna valovoda između kojih je mjerni uzorak bio postavljen u čeličnu ploču (slika 1). Uzorci su postavljeni između valovoda pomoću čelične ploče za koju je uzorak pričvršćen. Kako bi se izbjeglo otvaranje između uzorka i čelične ploče, postavljena je aluminijska folija koja pokriva sve otvore. Sva tri elementa (dva valovoda i srednja čelična ploča) spojena su međusobno pomoću vijaka.

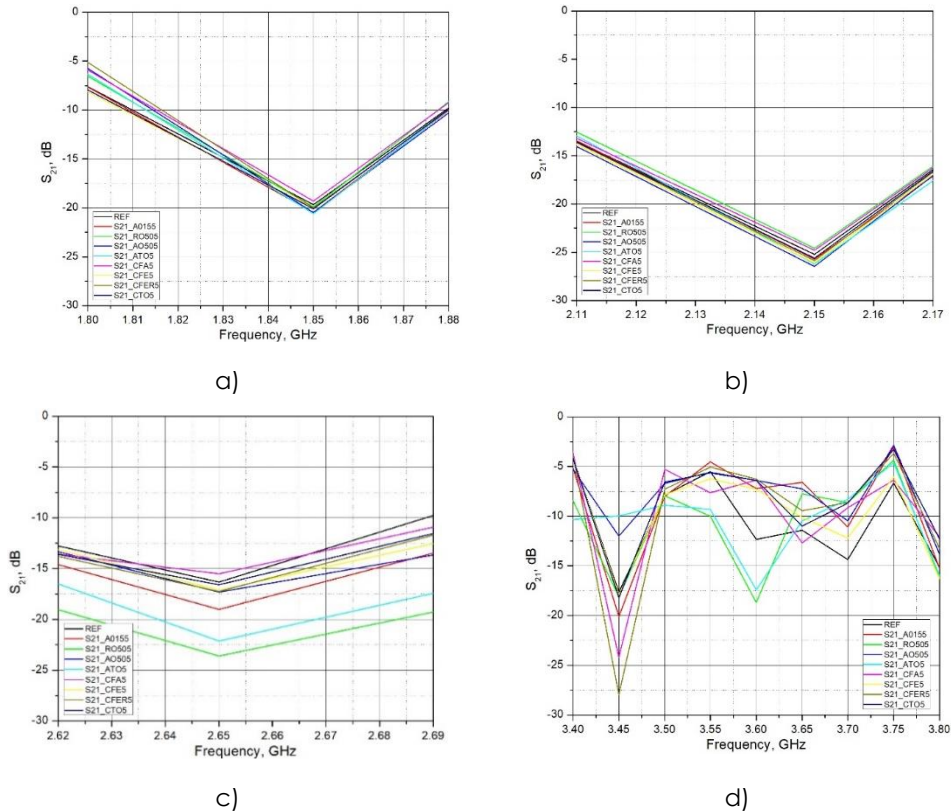


Slika 1. Postavka eksperimenta

## 3. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja

Rezultati mjerenja umanjavanja transmisije prikazani su na Slici 2. Na x osi prikazana je frekvencija u GHz, dok su na y osi prikazani rezultati transmisije za svaki uzorak. Iz navedenih rezultata može se zaključiti kako na području od 1,80 – 1,88 GHz i 2,11 – 2.17 GHz nije zabilježeno značajnije umanjavanje transmisije, dok na području 2.42 – 69 GHz najbolje rezultate ostvaruju uzorci s dodatkom TiO<sub>2</sub> i ATO, umanjavanje transmisije u odnosu na referentni uzorak je 10 dB. Na frekvencijama između 3,40 – 3.80 GHz većina dodataka

pokazuje poboljšanje u odnosu na referentni uzorak, dok na najvećem rasponu ponovno uzorci s TiO<sub>2</sub> i ATO pokazuju značajnija poboljšanja.



**Slika 2.** Izmjereni S<sub>21</sub> parametar uzoraka opeke za a) LTE1800, b) LTE2100, c) LTE 2600, d) NR3500

## 4. Zaključak

Ovim istraživanjem analizirane su mogućnosti elektromagnetske zaštite glinenih kompozita u neionizirajućem frekvencijskom rasponu od 1,5 GHz – 6 GHz. Kao djelomične zamjene gline korišteni su dodaci: leteći pepeo, četiri različite vrste TiO<sub>2</sub>, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i ATO. Poseban fokus bio je na određivanju koeficijenta prijenosa (S<sub>21</sub>). Iako je analiziran frekvencijski raspon 1,5 GHz – 6 GHz, veći fokus je stavljen na specifična područja, izvore sustava mobilne telefonije: LTE 1800, LTE 2100, LTE 2600 i NR3500 (5G



sustav). Analizirajući cjelokupni raspon frekvencija od 1,5 GHz – 6,0 GHz, a ne samo frekvencije koje se koriste za sustave mobilne telefonije, može se zaključiti da uzorci s ATO (svijetlo plava linije) ili TiO<sub>2</sub> (zelena linija) na većini frekvencija rezultiraju najnižim prijenosom transmisije. Navedeni rezultati ukazuju na potencijal korištenja antimon kositar oksida i titanijevog dioksida kao dodataka u glinenim opekama u svrhu poboljšanja otpornosti na prodor elektromagnetskog zračenja.

## Zahvale

Ovo istraživanje provedeno je u okviru operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014.-2020., Europskog fonda za regionalni razvoj, projekt naziva: „Razvoj i primjena naprednih građevinskih materijala za izgradnju zdravih zgrada: zaštita od neionizirajućeg zračenja-Z2grade“, KK.01.1.1.04.0105

## Literatura

- [1] Working Group Bioinitiative: Bioinitiative 2012: A Rationale for Biologically-based Exposure Standards for Low-Intensity Electromagnetic Radiation. pp. 1–1557. 2012.
- [2] IARC: IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans, World Health Organization. vol. 2008, no. May. pp. 1–6. 2011, [Online]. Available: [http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2011/pdfs/pr208\\_E.pdf](http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2011/pdfs/pr208_E.pdf)
- [3] Vrdoljak I, Varevac D, Miličević I, Čolak S: Concrete-based composites with the potential for effective protection against electromagnetic radiation: A literature review, Construction and Building Materials. vol. 326, no. December 2021. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126919.
- [4] Chen Z *et al.*: Conductive TiO<sub>2</sub> nanorods via surface coating by antimony doped tin dioxide, Materials Chemistry and Physics. vol. 225, no. December 2018. pp. 181–186. 2019, doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.12.065.

**NUMERIČKO MODELIRANJE PONAŠANJA  
DEMONTAŽNE POSMIČNE VEZE SPREGNUTIH  
NOSAČA IZVEDENIH OD HLADNO OBLIKOVANOG**  
Numerical study on behaviour of demountable  
shear connection cold-formed steel-concrete  
composite beam

**Vlaho Žuvelek<sup>1</sup>, Ivan Ćurković<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, vlaho.zuvelek@grad.unizg.hr

## Sažetak

Istraživanja su pokazala da se primjenom spregnutih sustava izvedenih od hladno oblikovanog čelika i betona postižu dodatne prednosti u odnosu na tradicionalna rješenja. Stoga su u ovom radu promatrana dva sustava gdje se jedan sustav sastoji od nosača koji je izveden od hladno oblikovanih profila (HOP) s valovitim hrptom sastavljenih uz pomoć točkastog zavarivanja i betonske ploče koji su međusobno povezani demontažnom vijčanom vezom. U odnosu na prvi, drugi sustav ne sadrži valoviti hrpat, nego je nosač izveden od HOP *back-to-back* načinom. Numeričkom analizom uspoređena su posmična ponašanja dvaju sustava što predstavlja podlogu za buduća eksperimentalna istraživanja. U radu je obuhvaćeno ponašanje sustava koji sadrže dva vijka postavljena u paru po rebru ili jedan vijak postavljen naizmjenice. Rezultati numeričke analize ukazuje da sustav s valovitim hrptom rezultira većom posmičnom otpornošću, dok općenito modeli koji sadrže dva vijka u paru po rebru osiguravaju veću krutost posmične veze, ali i reduciranu duktilnost u odnosu na sustav s jednim vijkom postavljenim naizmjenice.

*Ključne riječi: spregnuti nosač, hladno oblikovani čelik, točkasti zavari, demontažna posmična veza*

## Abstract

Research shows that composite systems made by cold-formed steel (CFS) and concrete achieve additional advantages over traditional solutions. Therefore, in this paper, two systems were observed where one system consists of built-up CFS beams with corrugated web, connected by spot-welds and concrete slab connected by demountable shear connection. The second system, compared to the first system, doesn't contain a corrugated web, but the beam is made of back-to-back CFS. The numerical analysis compared the shear behaviour of the two systems, which is the basis for future experimental research. The paper covers the behaviour of the system if it contains two bolts placed in the rib or one bolt in a staggered position. The results of the numerical analysis indicate that the first system results in higher shear strength, while models containing two bolts in the rib provide greater shear stiffness but also reduced ductility relative to one bolt placed in a staggered position.

*Keywords: composite beam, cold-formed steel (CFS), spot-weld, demountable shear connector*

## 1. Uvod

Spregnuti konstrukcijski sustavi jedni su od najisplativijih u građevinarstvu jer osim što osiguravaju visoku razinu konstrukcijske učinkovitosti istovremeno omogućavaju kraće vrijeme izgradnje. Prednosti spregnutih konstrukcijskih sustava mogu se i dodatno unaprijediti ukoliko se primjene novi sustavi koji su izvedeni od inovativnih hladno oblikovanih čeličnih nosača s valovitim hrptom, te su međusobno spojeni s betonskom pločom koristeći inovativni tip posmične veze [1]–[4]. HOP doprinose prednostima koje se očituju kroz smanjenje visine ploče, slobodu oblikovanja poprečnog presjeka, jednostavnu tehnologiju izrade, fleksibilnosti montaže na licu mjesta ili u radionici [5]. Posmična veza predstavlja važan segment konstrukcijskog ponašanja spregnutih nosača od čelika-betona koji će omogućiti međudjelovanje pojedinih dijelova. Ponašanje same posmične veze ovisi o stupnju posmične veze koji se može definirati kao omjer posmične otpornosti spojnih sredstava u odnosu na otpornost najslabije komponente spregnutog presjeka (u ovom slučaju čelične grede ili betonske ploče). Unutar Europskih normi [6] standardizirana je jedina vrsta posmične veze koja se ujedno danas i najčešće koristi, a ostvaruje se primjenom zavarenih moždanika s glavom. Detaljan kronološki pregled posmičnih veza koje omogućuje demontažu spregnutog sustava nedavno je prikazan u radu [7]. Jakovljević i dr. [7] ukazuju da postoje veliki problemi vezani za otpornost i duktilnost različitih demontažnih posmičnih veza koje zahtijevaju daljnje istraživanje. Na osnovu svega navedenog, vidljivo je da još uvijek postoji potreba za istraživanjem cjelokupnog ponašanja HOP-a u spregnutima sustavima kao i ponašanja demontažne posmične veze. Iz tog razloga, uspostavljen je istraživački projekt LWT-FLOOR kojem je jedan od ciljeva istražiti ponašanje posmične veze između čeličnog profila i armiranobetonske ploče kod spregnutih nosača izvedenih od hladno oblikovanih profila (HOP).

## 2. Numerički modeli

### 2.1. Vrsta i geometrija modela

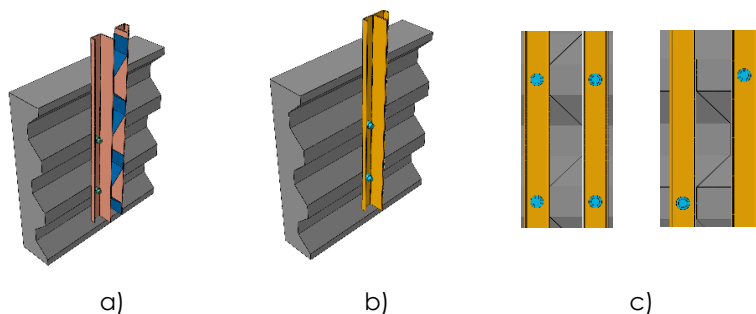
Trodimenzionalni modeli razvijeni su uz pomoću računalnog programa ABAQUS/CAE. Zbog same složenosti modela korišten je ABAQUS Explicit [8] kako bi se ostvarila uspješna konvergencija. Sustav sa valovitim hrptom je prikazan na Slici 1. (a), dok sustav sastavljen

od HOP *back-to-back* načinom na Slici 1.(b). Drugim riječima, sustav na Slici 1. (b) predstavlja sustav izveden od hladno-oblikovanih C profila spojenih u području hrpta pomoću točkastog zavarivanja. Vijčana veza je ostvarena primjenom vijaka s ugrađenom maticom u betonskoj ploči. Upotrebom takve vrste vijaka omogućuje se kontroliranje rotacije vijaka i njegovog pomaka tokom opterećivanja [7]. U ovom radu korišteni su vijci promjera 12 i 16 mm. S obzirom da će u eksperimentalnom ispitivanju biti korišteni vijci sa navojem čiji je radijus u području navoja reducirana, u modelima je na mjestu navoja između matica primijenjen reducirani radijus koji iznosi 10.4 mm za M12 i 14.1 mm za M16. Kao što je prethodno spomenuto, u svakom sustavu promatrane su dvije pozicije vijaka, u paru i naizmjenice, Slika 1. (c). U modelima su korišteni HOP dimenzija 120×47×3 mm i kvalitete čelika S350GD, dok su profilirani lim betonske ploče i valoviti hrbat dimenzija, redom 720×600×1 mm i 780×120×1.25 mm, te kvaliteta čelika DX51D. Armiranobetonska ploča je dimenzija 720×600×140 mm i modelirana je s klasom betona C20/25 uz armaturnu mrežu Q524. Tablica 1. prikazuje oznake svih 8 modela koji su razmatrani u ovom radu te vrstu i poziciju primijenjenih vijaka. Modeli koji sadrže oznaku 'W' predstavljaju modele sa valovitim hrbtom.

**Tablica 1.** Prikaz modela razmatranih u radu

Naziv modela	Vijci	Pozicija vijaka	Naziv modela	Vijci	Pozicija vijaka
M1W_1	M12	u paru	M2W_1	M16	u paru
M1W_2	M12	naizmjenice	M2W_2	M16	naizmjenice
M1_1	M12	u paru	M2_1	M16	u paru
M1_2	M12	naizmjenice	M2_2	M16	naizmjenice

Za HOP, betonsku ploču i vijke upotrijebljeni su volumni konačni elementi (C3D8), dok su profilirani lim i valoviti hrbat modelirani s plošnim konačnim elementima (S4R). Armaturna mreža u betonskoj ploči modelirana sa štapnim konačnim elementima (T3D2). Kako bi se optimiziralo trajanje numeričke analize, ali ipak postigli točni numerički rezultati, provedena je analiza osjetljivosti mreže ovisno o njezinoj veličini. Na kraju, odabrane veličine mreže bile su 10 mm za beton, profilirani lim i valoviti hrbat, 25 mm za armaturnu mrežu, 2 mm za vijke i 3 mm za CFS profile.



**Slika 1.** Numerički modeli: a) s valovitim hrptom; b) bez valovitog hrpta; c) položaj vijaka

## 2.2. Mehanička svojstva materijala

### 2.2.1. Čelik

U modelima je usvojena bilinearna krivulja za radni dijagram čelika sukladno EN 1993-1-5 Annex C [9]. Svi čelični elementi u modelima sadrže modul elastičnosti od 210 GPa, Poisson-ov koeficijent od 0.3 i gustoću čelika od  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Mehanička svojstva čelika korištenih u modelu prikazane su u Tablici 2.

**Tablica 2.** Mehanička svojstva čelika

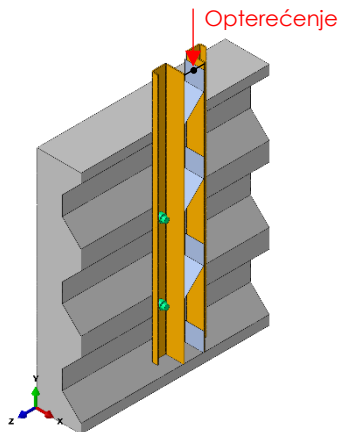
Čelik	$f_y \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$f_u \text{ (N/mm}^2\text{)}$
DX51D	270	325
S350GD	350	420
B500B	500	500
8.8	640	800

### 2.2.2. Beton

Zbog što točnijeg prikaza ponašanja armirano betonske ploče korišten je takozvani *concrete damaged plasticity model* (CDP). CDP model se zasniva na definiraju svojstava dvaju glavnih mehanizama otkazivanja betona tj. raspucavanje u vlaknu i drobljenje u tlaku. Parametri potrebni za definiranje takvog ponašanja preuzeti su iz [10] uz iznimku kuta dilatacije od  $31^\circ$  prema [11]. Za određivanje svih potrebnih parametara iz rada [10] korištena je gustoća od  $2400 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.3. Kontakti, rubni uvjeti i unos opterećenja

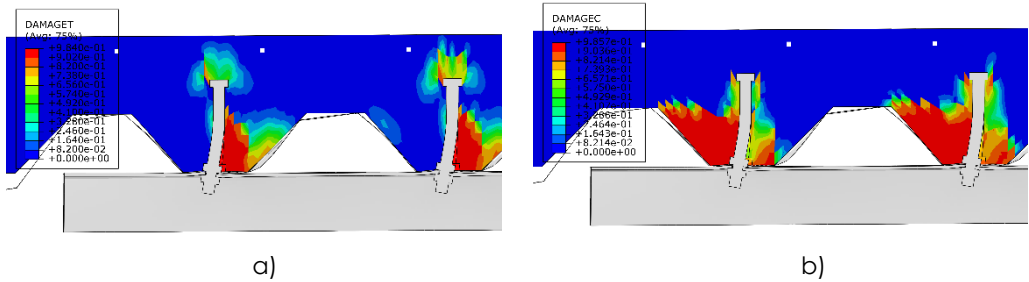
Kontaktno ponašanje između pojedinih elemenata razmatranih sustava ostvareno je primjenom takozvanih *surface-to-surface* i *general contact* opcija u Abaqus software-u [8] koje su definirane tako da sadrže normalno i tangencijalno ponašanje. Kod normalnog ponašanja u modelima onemogućeno je međusobno prodiranje jednog elementa u drugi, dok se tangencijalnim ponašanjem omogućuje trenje između pojedinih elemenata koje se definira koristeći koeficijent trenja koji je u ovom radu usvojen s vrijednošću od 0.3. Točkasti zavari su modelirani kao krute točke kako bi se spriječilo neželjeno otkazivanje istih. Unos opterećenja ostvaren je u obliku zadavanja jednolikog pomaka u vertikalnom smjeru (Y smjeru) u vrhu HO nosača, te iznosi ukupno 10 mm. Primijenjeni su simetrični rubni uvjeti na sredini svakog HO C profila, dok se oslanjanje uzorka ostvaruje preko donjih ploha armiranobetonske ploče gdje su te ravnine modelirane kao oslonci sa spriječenim pomacima u svim smjerovima. Na mjestu unosa opterećenja, onemogućena je translacija u x i z smjeru te rotacija oko istih osi kako bi se izbjeglo izbočivanje profila na mjestu unosa opterećenja.



**Slika 2.** Prikaz modela s položajem unosa opterećenja

### 3. Rezultati numeričkih analiza

Na osnovu dobivenih rezultata u svim modelima uočen je isti mod otkazivanja tj. otkazivanje betona gdje dolazi do drobljenja betona i stvaranje pukotina oko posmičnog spojnog sredstva, Slika 2.



**Slika 3.** Mod otkazivanja betona: a) drobljenje betona; b) vlačne pukotine

Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s karakterističnim vrijednostima koje su izračunate prema izrazima danima u Eurocode-u, EN 1993-1-8 [12] i EN 1994-1-1 [6], a prikazane su u Tablici 3. Navedene vrijednosti uključuju otpornost po omotaču rupe HOP profila ( $F_{b,Rk}$ ), otpornost poprečnog presjeka HOP profila ( $N_{Rk}$ ), otpornost posmične veze u čeliku ( $P_{Rk,S}$ ) ili u betonu ( $P_{Rk,C}$ ) sa i bez faktora redukcije,  $k_t$ . S obzirom da su rebra betonske ploče postavljena okomito na HOP, potrebno je izračunati faktor redukcije  $k_t$  kojim se dodatno može smanjiti otpornost posmične veze. Za odabranu geometriju profiliranog lima betonske ploče, faktor redukcije za modele koji sadrže dva vijka u paru po rebu iznosi 0.58, dok za vijke postavljene naizmjenice 0.81 sukladno izrazima danima u EN 1994-1-1 [6]. Za usporedbu numeričkih i analitičkih rezultata iz Tablice 3., proračunate karakteristične vrijednosti potrebno je pomnožiti s četiri odnosno s dva za modele koji sadrže vijke postavljene naizmjenice, izuzev vrijednosti  $N_{Rk}$ .

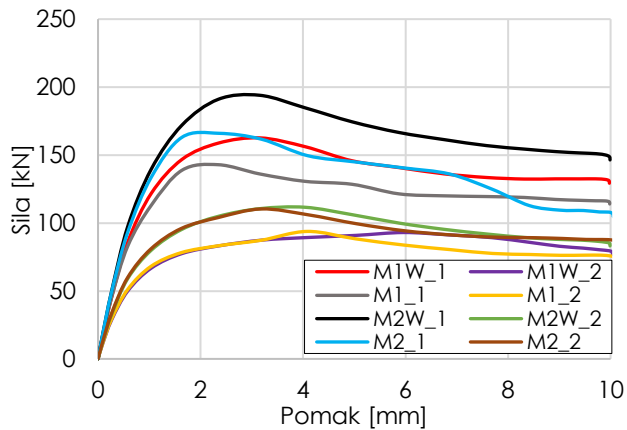
**Tablica 3.** Usporedba numeričkih i analitičkih vrijednosti u kN

Naziv modela	$F_{b,Rk}$	$N_{Rk}$	$P_{Rk,S}$	$k_t \cdot P_{Rk,S}$	$P_{Rk,C}$	$k_t \cdot P_{Rk,C}$	$F_{NUM}$	$F_{CALC}$	$\frac{F_{CALC}}{F_{NUM}}$	$\frac{k_t \cdot F_{CALC}}{F_{NUM}}$
M1W_1	32.8	235	54.4	31.6	32.3	18.7	162	129	0.80	0.46
M1W_2	32.8	235	54.4	44.1	32.3	26.2	93	64.6	0.70	0.56
M1_1	32.8	235	54.4	31.6	32.3	18.7	143	129	0.90	0.52
M1_2	32.8	235	54.4	44.1	32.3	26.2	94	64.6	0.70	0.56
M2W_1	44.4	235	100	58	57.5	33.4	194	230	1.19	0.70
M2W_2	44.4	235	100	81	57.5	46.6	112	115	1.03	0.83
M2_1	44.4	235	100	58	57.5	33.4	166	230	1.39	0.81
M2_2	44.4	235	100	81	57.5	46.6	110	115	1.05	0.85

Dobiveni rezultati upućuju da se kod modela s manjim promjerom vijaka faktor redukcije može potpuno zanemariti ili primijeniti s modificiranim vrijednostima, dok se za veće



promjere vijaka isti mora uzeti u obzir. Općenito rezultati pokazuju da su predložene vrijednosti faktora redukcije dane u EN 1994-1-1 [6] previše konzervativne, međutim treba uzeti u obzir da je njegova primjena upitna obzirom da su materijal kao i promjer korištenih vijaka u ovom radu izvan predloženih uvjeta danih u normi. Također numerički dobiveni odnos sile i pomaka za sve modele prikazan je na Slici 3.



**Slika 4.** Odnos sile i pomaka

Ukoliko promatramo krivulje modela s vijcima u paru po rebro, može se uočiti da modeli s valovitim hrptom (M1W\_1, M2W\_1) ostvaruju veću otpornost u odnosu na modele bez valovitog hrpta (M1\_1, M2\_1). Takvo ponašanje modela bez valovitog hrpta proizlazi iz činjenice da zbog malog razmaka posmičnih sredstava ne može doći do razvoja pune nosivosti betona u profiliranom rebro za svaki vijak posebno, jer vrlo brzo dolazi do preklapanja područja otkazivanja betona. Međutim, za modele koji sadrže jedan vijak u rebro naizmjenice, može se zaključiti da modeli sa (M1W\_2, M2W\_2) i bez (M1\_2, M2\_2) valovitog hrpta ostvaruju jednaku otpornost sa malim razlikama u duktilnosti posmične veze. Takvo ponašanje se ostvarilo zbog postavljanja vijaka naizmjenice čime je, zbog povećanog razmaka između vijaka, omogućeno formiranje pune nosivosti betona u profiliranom limu.

## 4. Zaključak

U ovom je radu numerički istraženo osam *push-out* modela kako bi se dobili rezultati koji će poslužiti kao podloga za provođenje stvarnih eksperimentalnih ispitivanja. Na osnovu dobivenih rezultata mogu se dati sljedeći zaključci koje je potrebno dodatno potvrditi eksperimentalnim istraživanjem.

- Posmična otpornost modela sa valovitim hrptom ukazuje na veću krutost i veću čvrstoću kada su vijci postavljeni u paru.
- Modeli sa i bez valovitog hrpta gdje su vijci postavljeni naizmjenice pokazuju jednaku krutost i čvrstoću. Međutim, potrebno je dodatno istražiti utjecaj razmaka vijaka unutar rebara betonske ploče na ponašanje modela.
- Potrebno je dodatno eksperimentalno istražiti utjecaj promjera vijka na otkazivanje preko betona kada su rebra ploče postavljena okomito na nosač.
- Potrebno je dodatno istražiti valjanost primjene faktora redukcije  $k_t$  kada se koriste čvrstoće čelika veće od 450 N/mm<sup>2</sup> i moždanici promjera manjeg od 16 mm.

## Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-2964 (LWT-FLOOR).

## Literatura

- [1] Wehbe N., Bahmani P., and Wehbe A., "Behavior of Concrete/Cold Formed Steel Composite Beams: Experimental Development of a Novel Structural System," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 7, 2013, no. 1, pp. 51–59, doi: 10.1007/s40069-013-0031-6.
- [2] Bamaga S. O. *et al.*, "Feasibility of developing composite action between concrete and cold-formed steel beam," *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, 2013, no. 12, pp. 3689–3696, Dec. doi: 10.1007/s11771-013-1897-9.
- [3] Irwan J. M., Hanizah A. H., and Azmi I., "Test of shear transfer enhancement in symmetric cold-formed steel-concrete composite beams," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, 2009, no. 12, pp. 2087–2098, doi: 10.1016/j.jcsr.2009.07.008.
- [4] Hsu C. T. T., Punurai S., Punurai W., and Majdi Y., "New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab," *Eng. Struct.*, vol. 71, 2014, pp. 187–200, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.04.011.
- [5] Hanaor A., "Tests of composite beams with cold-formed sections," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 54, 2000, no. 2, pp. 245–264, doi: 10.1016/S0143-974X(99)00046-2.
- [6] European Committee for Standardization CEN, EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.

- [7] Jakovljević I., Spremić M., and Marković Z., "Demountable composite steel-concrete floors: A state-of-the-art review," *Gradjevinar*, vol. 73, 2021, no. 3, pp. 249–263, doi: 10.14256/JCE.2932.2020.
- [8] User CAE. Abaqus 2016 (2016).
- [9] European Committee for Standardization CEN, EN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-5: Plated Structural Elements, 2005.
- [10] Lukačević I., Čurković I., Rajić A., and Bartolac M., "Lightweight Composite Floor System—Cold-Formed Steel and Concrete—LWT-FLOOR Project," *Buildings*, vol. 12, 2022, no. 2, doi: 10.3390/buildings12020209.
- [11] Arezoomand Langarudi P. and Ebrahimnejad M., "Numerical study of the behavior of bolted shear connectors in composite slabs with steel deck," *Structures*, vol. 26, 2020, pp. 501–515, doi: 10.1016/j.istruc.2020.04.037.
- [12] European Committee for Standardization CEN, EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-8: Design of joints, 2005.

UTJECAJ RECIKLIRANE GUME NA TLAČNU  
ČVRSTOĆU CEMENTOM STABILIZIRANIH  
MJEŠAVINA

Influence of recycled rubber on compressive  
strength of cement stabilized mixtures

**Matija Zvonarić<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet  
Osijek, Zavod za geotehniku, prometnice i geodeziju; e-adresa: mzvonic@gfos.hr

## Sažetak

Pojava nastanka pukotina u cementom stabiliziranom nosivom sloju kolnika se pokazala kao velik nedostatak ovih slojeva. Ove pukotine se pod utjecajem prometnog opterećenja šire na asfaltne slojeve i kao posljedica nastaju oštećene vozne površine kolnika. Kako bi se spriječio ili barem smanjio nastanak spomenutih pukotina, u ovom radu je analiziran utjecaj reciklirane gume na tlačnu čvrstoću stabiliziranih mješavina. U radu je analizirana tlačna čvrstoća referentne stabilizacijske mješavine sa cementom i dvije mješavine s 20% i 40% reciklirane gume nakon 7 i 28 dana. Dobivene vrijednosti su uspoređene s propisanim vrijednostima za cementom stabilizirane mješavine prema Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama.

*Ključne riječi: cementom stabilizirani nosivi sloj, reflektivne pukotine, reciklirana guma, RubSuPave*

## Abstract

Crack appearance in cement stabilized base course proved to be a major drawback of these courses. Under influence of traffic load, these cracks propagate to asphalt layers and as a result, deteriorated driving surface occurs. In order to prevent or, at least, reduce the occurrence of aforementioned cracks, this paper includes an analysis of the influence of recycled rubber on compressive strength of the reference mixture and two mixtures with recycled rubber after 7 and 28 days of curing regime. These values were compared to the required values for the observed mixtures according to Croatian general technical conditions for roadworks.

*Keywords: cement stabilized base course, reflective cracks, recycled rubber, RubSuPave*

## 1. Uvod

Zbog sve većeg broja vozila na cestama, čiji broj iz godine u godinu raste, projektiranje i gradnja kolničkih konstrukcija je vrlo izazovan posao. Na državnim cestama u Republici Hrvatskoj je u 2021. godini prosječni godišnji dnevni promet (PGDP) je iznosio 4221, dok je na autocestama PGDP iznosio 13611 [1]. Za procjenu rasta prometa u obzir je uzeta 2011. godina što čini 10-godišnji period. Na državnim cestama je PGDP 2011. godine iznosio 3514, a na autocestama 11683 [2]. Porast prometa u 10 godina na državnim cestama Republike Hrvatske iznosi 20,12%, a na autocestama 16,50%. Pri tome se duljina mreže državnih cesta povećala za 7.15%, a autocesta za oko 7.08%. U istraživanju su analizirane ceste namijenjene teškom i vrlo teškom prometu, čija se kolnička konstrukcija uglavnom sastoji od nevezanog nosivog sloja (NNS), cementom stabiliziranog nosivog sloja (CNS) te asfaltnih slojeva. Dovoljnu nosivost ovih kolničkih konstrukcija osigurava cementom stabilizirani nosivi sloj. Unatoč doprinosu nosivosti konstrukcije, CNS karakterizira velika krutost uz što se veže problem nastanka pukotina i preslikavanja tih pukotina na asfaltno slojeve, a što je pobliže opisano u radovima [3–5]. Stoga je potrebno pronaći kompromisno rješenje između nosivosti i krutosti stabilizacijske mješavine. Potencijal za smanjenje razvoja pukotina u CNS – u pokazuje reciklirana guma zbog svoje elastičnosti i sposobnosti apsorpcije energije. Provedeno je nekoliko istraživanja na ovu temu. Guma negativno utječe na čvrstoću mješavina što je navedeno u radovima [6–12], ali doprinos gume u cementom stabiliziranim mješavinama se očituje u nižim vrijednostima statičkih [7, 8] i dinamičkih [9] modula elastičnosti u usporedbi s referentnim mješavinama. Niže vrijednosti modula elastičnosti karakteriziraju elastičnije mješavine. Kao razloge za smanjenje čvrstoće mješavine i ujedno smanjenje njihove krutosti autori navode elastičnu prirodu gume i njezinu nisku specifičnu težinu. Naime, guma zbog niske gustoće preuzima ulogu zračnih pora unutar strukture mješavine i time oslabljuje mješavinu, dok zbog elastične prirode apsorbira preuzetu energiju i ne prenosi ju na ostatak mješavine. Zbog znatnog negativnog utjecaja gume na čvrstoću mješavine, ona se koristi u malim količinama. Za izgradnju tako velikih infrastrukturnih objekata kao što su ceste, potrebna je velika količina materijala, čime je omogućeno da se, unatoč malom udjelu gume u stabilizacijskim mješavinama, znatna količina gume ugradi u ovakve objekte. Upotreba gume u cestogradnji, osim potencijala za smanjenje reflektivnih

pukotina, je i ekološki prihvatljiva jer se time otvara prostor za zbrinjavanje otpadne gume koja je sve veći ekološki problem.

Cilj ovog istraživanja je definiranje najveće primjenjive količine gume u mješavinama za izradu cementom stabiliziranog nosivog sloja sasatavljenih od lokalno dostupnih materijala uz uvjet da zadrže zadovoljavajuću razinu čvrstoće.

## 2. Materijali i metode

Za potrebe provođenja ovog istraživanja korišten je dravski pijesak (0-2 mm) i 3 frakcije savskog šljunka (0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm). Kao vezivo, korišten je brzovežući portland cement klase 32,5 (CEM II B/M (P-S) 32,5R). Referentna mješavina je sastavljena od jednake količine sve 4 frakcije prirodnog agregata i 5% cementa. Za mješavine s gumom, korišten je gumeni granulat veličine zrna 0-0,5 mm. Guma je korištena kao volumna zamjena za pijesak zbog sličnog granulometrijskog sastava. Pijesak je zamijenjen s gumom u volumnom udjelu od 20% i 40%. Referentna mješavina je označena s C5R0, dok su mješavinama s 20% i 40% gume dodijeljene oznake C5R20 i C5R40. Sastav stabilizacijske mješavine je kreiran na način da granulometrijska krivulja mješavine bude položena u sredinu raspona između donje i gornje granice za hidrauličnim vezivom vezane mješavine prema Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama (OTU) [13]. Nakon definiranja receptura, standardni Proctorovi uzorci su zbijeni pomoću vibrirajućeg čekića prema normi HRN EN 13286-51 [14]. Postupak izrade uzoraka ovom metodom detaljnije je opisan u radu [11]. Izrađeno je 6 uzoraka od svake mješavine. Uzorci su stavljeni na njegu u klima komoru na 28°C i 90% relativne vlage. Prva skupina uzoraka (po 3 uzorka od svake mješavine) je njegovana 7 dana, dok je druga njegovana 28 dana. Nakon završetka propisanog režima njege, ispitana je tlačna čvrstoća uzoraka prema normi HRN EN 13286-41 [15].

### 3. Rezultati

Rezultati dobiveni ispitivanjem prikazani su u Tablici 1.

**Tablica 1.** Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Mješavina	Tlačna čvrstoća nakon 7 dana njege $f_{c7}$ (MPa)	Tlačna čvrstoća nakon 28 dana njege $f_{c28}$ (MPa)
C5R0	4,1067	6,4537
C5R20	2,2043	3,0093
C5R40	1,3201	1,5116

Temeljem dobivenih rezultata, može se zaključiti kako guma, čak i u malim količinama znatno utječe na tlačnu čvrstoću mješavina. Zamjenom 20% volumena pijeska s gumom, tlačna čvrstoća mješavine nakon 7 i 28 dana se smanjila za 46% i 53%. Povećanjem količine gume na 40% 7 - dnevna tlačna čvrstoća iznosi samo 32% tlačne čvrstoće referentne mješavine, dok 28 - dnevna tlačna čvrstoća iznosi 23% tlačne čvrstoće referentne mješavine. Prema OTU [13] zadovoljavajuća tlačna čvrstoća mješavine nakon 7 dana iznosi 1,5-5,5 MPa, dok se zadovoljavajuća 28 – dnevna tlačna čvrstoća nalazi u rasponu između 2,5 - 6,0 MPa za kolničke konstrukcije cesta teškog i srednje teškog prometnog opterećenja. Za autoceste i kolničke konstrukcije cesta vrlo teškog prometnog opterećenja zadovoljavajući intervali iznose 2,0 – 5,5 i 3,0 – 6,0 za 7 – dnevnu i 28 – dnevnu tlačnu čvrstoću. Prema zadanim kriterijima, mješavina C5R0 razvija preveliku čvrstoću nakon 28 dana, dok mješavina C5R40 ne razvija dovoljnu razinu čvrstoće niti nakon 7 niti nakon 28 dana za obje razine prometnog opterećenja. Prevelika čvrstoća mješavine C5R0 upućuje i na preveliku razinu krutosti te mješavine što bi dodatno ubrzalo nastanka pukotina i njihovo širenje pod prometnim opterećenjem. Kao optimalna se pokazala mješavina C5R20. Na temelju dobivenih rezultata, mješavina C5R20 ocijenjena je pogodnom za ugradnju u kolničke konstrukcije cesta obje razine prometnog opterećenja definirane u OTU [13].

### 4. Zaključak

Provedeno istraživanje obuhvaća ispitivanje tlačne čvrstoće cementom stabiliziranih mješavina nakon 7 i 28 dana njege. Ispitane su 3 mješavine različitog sastava, jedna



referentna i dvije s recikliranom gumom kao volumnom zamjenom za pijesak. Analizom rezultata je zaključeno kako i mala količina gume ima značajan utjecaj na vrijednost tlačne čvrstoće, a kao optimalna mješavina ocijenjena je mješavina s 20% gume. Ovakva mješavina je primjenjiva i u kolničkim konstrukcijama autocesta i cesta vrlo teškog prometnog opterećenja, kao i u kolničkim konstrukcijama cesta teškog i srednje teškog prometnog opterećenja.

## Zahvale

Ovo istraživanje je financirala Hrvatska zaklada za znanost u sklopu projekta UIP-2019-04-8195 Cementom stabilizirani nosivi slojevi s recikliranom gumom za održive kolnike – RubSuPave.

## Literatura

- [1] Božić, M., Kopic, D., Gršetić, J. et al.: *Brojanje prometa na cestama Republike Hrvatske 2021.*, Prometis d.o.o., 2021., Hrvatske ceste, link: <https://hrvatske-ceste.hr/hr/stranice/promet-i-sigurnost/dokumenti/14-brojenje-prometa> (pristupljeno: 11.7.2022.)
- [2] Božić, M., Kopic, D., Mihoci, F.: *Brojanje prometa na cestama Republike Hrvatske godine 2011.*, Prometis d.o.o., 2012., Hrvatske ceste, link: <https://hrvatske-ceste.hr/hr/stranice/promet-i-sigurnost/dokumenti/14-brojenje-prometa> (pristupljeno: 11.7.2022.)
- [3] Zvonarić, M., Dimter, S.: Prevention and remediation measures for reflective cracks in flexible pavements, *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 74, 2022, 189–197, DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.3427.2021>
- [4] Adaska, W.S., Luhr, D.R., Control of reflective cracking in cement-stabilized pavements, *5th International RILEM Conference in Pavements: Mitigation, Risk Assessment and Prevention*, Petit, C., Al-Quadi, I.L., Millien, A., Limoges, France, RILEM
- [5] Wang, X., Li, K., Zhong, Y. et al., XFEM simulation of reflective crack in asphalt pavement structure under cyclic temperature, *Construction and Building Materials*, 189, 2018, 1035–1044, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.202>
- [6] Sun, X., Wu, S., Yang, J. et al., Mechanical properties and crack resistance of crumb rubber modified cement-stabilized macadam. *Construction and Building Materials*; 259, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119708>
- [7] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H., Compressive behaviour of rubberized cement-stabilized aggregate mixtures, 262, 2020, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120038
- [8] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H., Characterization of rubberized cement bound aggregate mixtures using indirect tensile testing and fractal analysis. *Construction and Building Materials*, 105, 2016, 105: 94–102, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120038>
- [9] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H. et al., Flexural characteristics of rubberized cement-stabilized crushed aggregate for pavement structure, *Materials and Design*, 88, 2015, 897–905, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.071>
- [10] Turatsinze, A., Bonnet, S., Granju, J.-L., Cement - based materials incorporating rubber aggregates: shrinkage length changes, *Brittle Matrix Composites 7*, Brandt, A.M., Li, V.C., Marshall, I.H., Warsaw, ZTUREK RSI and Woodhead Publishing, 2003

- [11] Zvonarić, M., Barišić, I., Galić, M., Minaažek, K., Influence of Laboratory Compaction Method on Compaction and Strength Characteristics of Unbound and Cement-Bound Mixtures, *Applied Sciences*, 11, 2021, DOI: <https://doi.org/10.3390/app11114750>
- [12] Zvonarić, M., Barišić, I., Dokšanović, T., Zagvozda, M., Preliminary research on waste rubber application in cement bound base layer, *30th International Baltic Road Conference (IBRC 2021)*, Riga, Latvia, Institute of Physics Publishing (IOP), DOI: 10.1088/1757-899X/1202/1/012047
- [13] Đukan, P., Tomljanović, Z., *Knjiga V Kolnička konstrukcija, Opći tehnički uvjeti za radove na cestama*, Institut Građevinarstva Hrvatske, 2001.
- [14] *HRN EN 13286-51:2004 Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 51. dio: Metoda za izradu ispitnih uzoraka hidrauličnim vezivom vezanih mješavina zbijanjem vibracijskim čekićem*. Brussels, Belgium, 2004.
- [15] *HRN EN 13286-41- dio: Ispitna metoda za određivanje tlačne lvrstoće hidrauličnim vezivom vezanih mješavina*. Brussels, Belgium, 2021.



# NUMERIČKA ANALIZA SPREGNUTOG SUSTAVA HLADNO OBLIKOVANI ČELIK - BETON S DEMONTAŽNIM POSMIČNIM SPOJEM

Numerical analysis of composite system cold  
formed steel - concrete with demountable shear  
connection

**Andrea Rajić<sup>1</sup>, Ivan Lukačević<sup>2</sup>**

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, andrea.rajic@grad.unizg.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ivan.lukacevic@grad.unizg.hr

## Sažetak

Osim povoljnog iskorištenja upotrijebljenih materijala u spregnutim sustavima, spregnuti sustavi čelik-beton poznati su po montažnoj ugradnji i sposobnosti svladavanja velikih raspona. S obzirom na navedene prednosti, mogućnost uporabe ovog tipa sustava je raznolika. Ovaj rad predstavlja numeričku analizu spregnutog nosača izvedenog od hladno oblikovanog čeličnog profila koji je povezan inovativnim demontažnim sredstvima s betonskom pojasnicom. Karakteristike osnovnog materijala, točkastih zavara te sredstava demontažnog posmičnog spoja dobivene su laboratorijskim ispitivanjima provedenim u sklopu LWT-FLOOR projekta na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Istražen je utjecaj broja točkastih zavara u sustavu čeličnog nosača, utjecaj vrste betona te stupnja spreznjanja posmičnog spoja na nosivost spregnutog nosača.

*Ključne riječi: numerička analiza, spregnuti nosač, hladno oblikovani čelik, demontažni posmični spoj*

## Abstract

Besides the utilisation of used materials in composite systems, cold-formed steel (CFS)–concrete systems are known for prefabricated construction and long-span capability. Considering all mentioned advantages, the usage of this type of system is various. This paper presents a numerical analysis of a composite system formed of a cold-formed steel section connected to the concrete slab by an innovative demountable shear connection. The characteristics of base material, spot welds and demountable shear connectors are given by laboratory research conducted as a part of the LWT-FLOOR project at the Faculty of Civil Engineering at the University of Zagreb. The impacts of spot weld density, type of concrete and the degree of shear connection on the bending resistance of the composite system were analysed.

*Keywords: numerical analysis, composite system, CFS, demountable shear connection*

## 1. Uvod

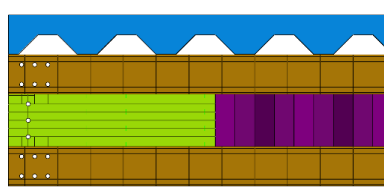
Spregnute konstrukcije čelik-beton pokazale su svoju značajnu učinkovitost u primjeni kod nosivih konstrukcija. Glavne prednosti spregnutog sustava čelik-beton su montažna gradnja, jednostavna ugradnja te svladavanje velikih raspona. U težnji za poboljšanjem spregnutih konstrukcija čelik-beton započeta je primjena hladno oblikovanih čeličnih elemenata koji mogu smanjiti vlastitu težinu cjelokupnog sustava kao i primjena lakoagregatnog betona [1]. S obzirom na korištenje dvaju različitih materijala, u spregnutim sustavima čelik-beton bitno je osigurati spoj između elemenata formiranih od navedenih materijala koji se ostvaruje korištenjem sredstava za sprezanje. Hanaour [2] je istraživao utjecaj stupnja sprezanja posmičnog spoja za različite vrste sredstava za sprezanje. Pokazano je kako se pravilnim oblikovanjem sustava može postići izrazito povoljna nosivost. Isti učinak regulira se rasporedom sredstava za sprezanje u sustavu. S obzirom da su sredstva za sprezanje uglavnom zavarena za čelični nosač, stvorila se ideja o demontažnim sredstvima za sprezanje kojim bi se omogućilo rastavljanje konstrukcije na kraju njenog životnog vijeka [3]. Osim načina oblikovanja posmičnog spoja, bitan je i način povezivanja čeličnih dijelova sustava u cjelinu - broj i raspored točkastih zavara [5–7], dok se u svrhu povećanja stabilnosti nosača upotrebljava valoviti hrbat [8–10].

S obzirom na navedene prednosti i mogućnosti unaprjeđenja spregnutog sustava formiranog od hladno oblikovanog čelika i betona, predmet istraživanja u ovome radu je utjecaj stupnja sprezanja posmičnog spoja u slučaju demontažnog posmičnog spoja koji je ostvaren između betona (lakoagregatni i normalnoteški) i sastavljenih hladno oblikovanih čeličnih profila s valovitim hrptom. Istražen je i utjecaj različitog broja i rasporeda točkastih zavara između čeličnih profila. Predmet istraživanja je dio LWT-FLOOR projekta koji se povodi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Dobiveni rezultati koristit će se kao osnova za planiranje ispitivanja koja će se provesti u budućnosti.

## 2. Numerička analiza

Numerička analiza provedena je u računalnom programu ABAQUS/CAE [11]. S obzirom na visoki stupanj nelinearnosti provedena je eksplicitna analiza. Formirano je 18 modela jednostavno oslonjenih nosača koji se sastoje od četiri hladno oblikovana C120 profila koji su točkastim zavarima preko dvije (02) ili tri (03) točke povezani s drugim čeličnim

elementima. Opterećenje je definirano pomakom od 100 mm koji se unosi na četiri pozicije na nosaču. Karakteristike ponašanja točkastih zavara su dobivene obradom rezultata provedenih laboratorijskih ispitivanja. Osim povezivanja čeličnih elemenata preko točkastih zavara, razmatrana je opcija kada su elementi spojeni na području cijele dodirne površine (oznaka: tie).



**Slika 1.** Razmatrani spregnuti nosač

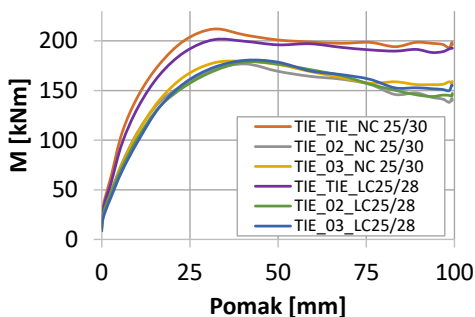
**Tablica 1.** Geometrijske karakteristike [mm]

Visina betonske ploče	120
Debljina valovitog hrpta	0.8
Debljina posmičnih ploča	1.0
Debljina valovitog lima	1.0
Visina vijka	84

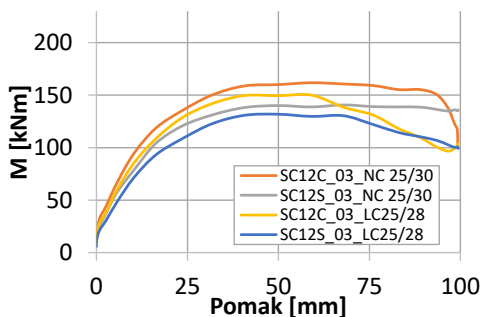
Zajedničko djelovanje čeličnih profila i betonske ploče ostvarena je posmičnim spojem koji osiguravaju demontažni moždanici, tj. vijci M12, k.v. 8.8 modelirani B31 konačnim elementima (linearni gredni element definiran s dva čvora) s definiranim karakteristikama vijaka također dobivenim laboratorijskim ispitivanjima materijala vijaka. Vijci su postavljeni u svako rebro valovitog lima u paru (SC12C) ili u naizmjeničnom rasporedu (SC12N) dok im je visina određena prema odredbama iz europske norme [12]. Razmatran je i slučaj kad je ostvaren puni stupanj spreznja posmičnog spoja (oznaka: tie). Betonska ploča u koju su ugrađeni vijci definirana je za lakoagregatni LC25/28 te normalnoteški NC25/30 beton čije su karakteristike određene modelom plastičnog oštećivanja prema [13]. Približna veličina mreže konačnih elemenata za sve čelične elemente iznosi 20 mm, betonsku ploču 30 mm, dok za vijke iznosi 7 mm.

### 3. Rezultati i diskusija

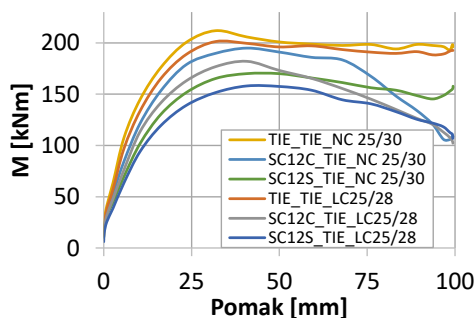
Slike 2-5 prikazuju utjecaj broja točkastih zavora u sustavu čeličnog nosača, utjecaj razreda betona te stupnja spreznjanja posmičnog spoja na nosivost spregnutog nosača. Prema priloženim rezultatima numeričkih analiza, na slikama 2-5, utjecaj broja točkastih zavora je značajno manji od utjecaja stupnja spreznjanja i razreda betona na otpornost sustava na savijanje (M). Prema slici 3, može se vidjeti kako normalnoteški beton daje otprilike za 10 kNm veću otpornost na savijanje u odnosu na lakoagregatni.



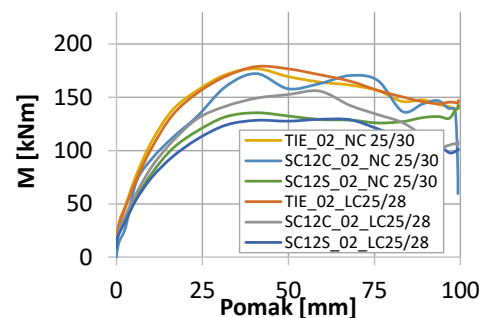
Slika 2. Utjecaj broja točkastih zavora



Slika 3. Utjecaj razreda betona



Slika 4. Utjecaj stupnja spreznjanja - čelični elementi - tie spoj



Slika 5. Utjecaj stupnja spreznjanja - čelični elementi - 02

Najveći utjecaj pokazao je stupanj spreznjanja kod kojeg se otpornost na savijanje povećava za 45 kNm od djelomičnog (SC12S) do punog stupnja spreznjanja (tie).



## 4. Zaključak

Rezultati numeričkih analiza pokazali su da najveći utjecaj na otpornost na savijanje od razmatranih utjecaja u sustavu ima stupanj sprezanja posmičnog spoja dobiven različitim rasporedom sredstava za sprezanje. Utjecaj broja točkastih zavara iznimno je malen, ali prisutan dok modeli s lakoagregatnim betonom uslijed ranijeg drobljenja betona imaju manju otpornost na savijanje u usporedbi s modelima s normalnoteškim betonom.

## Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-2964 (LWT-FLOOR).

## Literatura

- [1] Dujmović, D., Androić, B., Lukačević, I.: Composite Structures According to Eurocode 4: Worked Examples, 2015., <https://doi.org/10.1002/9783433604908>.
- [2] Hanaor, A.: Tests of composite beams with cold-formed sections, *Journal of Constr. Steel Res.* 2000;54:245–64. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00046-2).
- [3] Jung, D.S., Park, S.H., Kim, T.H., Han, J.W., Kim, C.Y.: Demountable Bolted Shear Connector for Easy Deconstruction and Reconstruction of Concrete Slabs in Steel–Concrete Bridges, *App. Sci.* 2022;12. <https://doi.org/10.3390/app12031508>.
- [5] Landolfo, R., Mammana, O., Portioli, F., Di Lorenzo, G., Guerrieri, M.R.: Laser welded built-up cold-formed steel beams: Experimental investigations, *Thin-Walled Struct* 2008;46:781–91. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.03.009>.
- [6] Briskham, P., Blundell, N., Han, L., Hewitt, R., Young, K., Self-Pierce Riveting BDC. Resistance Spot Welding and Spot Friction Joining for Aluminium Automotive Sheet, *Proc. SAE 2006 World Congr. Exhib.*, Detroit, MI, USA: 15
- [7] Guenfoud, N., Tremblay, R., Rogers, C.A.: Arc-Spot Welds for Multi-Overlap Roof Deck Panels. *Proc. Twent. Int. Spec. Conf. Cold-Formed Steel Struct.* St. Louis, MO, USA: 535-549
- [8] Dubina, D., Ungureanu, V., Gilja, L.: Cold-formed steel beams with corrugated web and discrete web-to-flange fasteners, *Steel Construction* 2013;6:74–81. <https://doi.org/10.1002/stco.201310019>.
- [9] Dubina, D., Ungureanu, V., Dogariu, A.: Lightweight Footbridges of Cold Formed Steel Corrugated Web Beams: Technical Solution And Evaluation, *8th Int. Symp. Steel Bridg. Innov. New Challenges* 2015, Istanbul: 2015.
- [10] Ungureanu, V., Dubina, D.: Influence of Corrugation Depth on Lateral Stability of Cold-Formed Steel Beams of Corrugated Webs. *Acta Mech Autom* 2016;10:104–11. <https://doi.org/10.1515/ama-2016-0017>.
- [11] Corp DSS. Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS, User's Manual 2016.
- [12] European Committee for Standardization CEN. EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.
- [13] Lukačević, I., Čurković, I., Rajić, A., Bartolac, M. Lightweight Composite Floor System—Cold-Formed Steel and Concrete—LWT-FLOOR Project. *Buildings*, 12 <https://doi.org/10.3390/buildings12020209>.

## Indeks autora

Prezime	Ime	Stranica
Begić	Hana	1
Boko	Ivica	41
Brzić	Luka	57
Bujak	Damjan	65
Burnač	Krešimir	9
Bušić	Robert	19
Carević	Dalibor	65
Ćurković	Ivan	107
Džeba	Tatjana	27
Galić	Mario	1
Gojević	Anita	35
Goreta	Marko	41
Haladin	Ivo	9
Hržić	Tin	49
Jelčić Rukavina	Marija	87
Krajnović	Marija	57
Lukačević	Ivan	125
Lukić	Zoran	19
Mamić	Domagoj	57
Miličević	Hanna	65
Miličević	Ivana	19, 101
Netinger Grubeša	Ivanka	35
Obradović	Dino	71
Raguž-Lučić	Nikolina	79
Rajić	Andrea	125
Rupčić	Slavko	101
Ščapec	Tomislav	87
Torić	Neno	41
Varevac	Damir	93
Virovkić	Luka	93
Vrdoljak	Ivan	101
Žuvelek	Vlaho	107
Zvonarić	Matija	117



ISBN 978-953-6962-67-9