

# Zajednički temelji 2023. - uniSTem : deseti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, 14.-17. rujna 2023., Split : zbornik radova

---

**Edited book / Urednička knjiga**

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

*Publication year / Godina izdavanja:* **2023**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:182530>

<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



# Z 2023



**Zajednički Temelji**  
**2023. - uniSTem**

14. - 17.  
rujna 2023.

**SPLIT**

**X. skup mladih istraživača iz područja  
građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti**

**ZAGREB | SPLIT | RIJEKA | OSIJEK | MOSTAR**

**Zbornik radova**



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



SVEUČILIŠTE U SPLITU,  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

## Izdavač

Sveučilište u Splitu  
Fakultet građevinarstva,  
arhitekture i geodezije,  
Matice hrvatske 15, Split

## Urednici

Doc. dr. sc. Ivan Banović  
Doc. dr. sc. Ana Kadić  
Dr. sc. Biljana Maljković  
Doc. dr. sc. Marina Sunara

## Lektura (hrvatski):

Ivanica Debak Banović, prof.

## Lektura (engleski):

Mia Vukelić, prof.

## Tisak

Redak, Split

## Naklada

84 primjerka

**ISBN 978-953-6116-97-3**

**e-ISBN 978-953-6116-98-0**

<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023>

Split, rujan 2023.

-----  
CIP - Katalogizacija u publikaciji  
SVEUČILIŠNA KNJIŽNICA  
U SPLITU

UDK 624(062)(082)  
72(062)(082)  
528(062)(082)

SKUP mladih istraživača iz područja  
građevinarstva i srodnih tehničkih  
znanosti Zajednički temelji (10 ; 2023 ;  
Split)

Zajednički temelji 2023 - uniSTem :  
deseti skup mladih istraživača iz  
područja  
građevinarstva i srodnih tehničkih  
znanosti, 14.- 17. rujna 2023., Split :  
zbornik radova / [urednici Ivan Banović  
... et al.]. - Split : Sveučilište u  
Splitu, Fakultet građevinarstva,  
arhitekture i geodezije, 2023.

Bibliografija uz svaki rad. - Sažeci ;  
Abstracts.

ISBN 978-953-6116-97-3

1. Banović, Ivan  
I. Građevinarstvo -- Zbornici II.  
Arhitektura -- Zbornici III. Geodezija --  
Zbornici

190828041  
-----

*Iako su poduzete sve mjere da se sačuva integritet i kvaliteta ove publikacije i u njoj sadržanih podataka, izdavač, urednik i autori ne smatraju se odgovornima za bilo koju štetu nanесenu imovini ili osobama zbog primjene ili korištenja ove knjige ili zbog korištenja u njoj sadržanih informacija, uputa ili ideja. Radovi objavljeni u knjizi izražavaju mišljenja autora koji su i odgovorni za objavljene sadržaje. Cjeloviti radovi smiju se reproducirati ili prenositi amo uz pismenu suglasnost izdavača. Manji dijelovi mogu se reproducirati samo uz odgovarajuće citiranje izvora.*

Sveučilište u Splitu  
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije



# **ZAJEDNIČKI TEMELJI 2023. - uniSTem**

**X. skup mladih istraživača iz područja građevinarstva  
i srodnih tehničkih znanosti**

## **Zbornik radova**

14. - 17. rujna 2023., Split

## **Predsjednik Organizacijskog odbora skupa**

Ante Buzov

### **Organizacijski odbor skupa**

Antonia Čikeš  
Adrijana Vrsalović  
Ana Kadić  
Ante Buzov  
Biljana Maljković  
Bruno Bartulović  
Emanuela Tomelić  
Frane Gilić  
Gabrijela Grozdanić  
Goran Baloević  
Iva Aljinović  
Ivan Banović  
Ivan Lovrinović  
Ivan Racetin  
Jadran Čarija  
Jelena Lovrić Vranković  
Josip Peroš  
Katarina Rogulj  
Majda Česić  
Marija Kvesić  
Marija Smilović Zulim  
Marko Goreta  
Marina Sunara  
Marina Tavra  
Martina Milat  
Matej Šodan  
Morena Galešić Divić  
Mia Raos  
Mijo Nikolić  
Nikola Grgić  
Nives Brajčić Kurbaša  
Petra Šimundić  
Samanta Bačić  
Toni Kekez

### **Moderatori sekcija**

Ana Kadić  
Biljana Maljković  
Goran Baloević  
Ivan Lovrinović  
Ivan Racetin  
Jadran Čarija  
Katarina Rogulj  
Marija Smilović Zulim  
Martina Milat  
Mijo Nikolić  
Nives Brajčić Kurbaša

## PREDGOVOR

Zadovoljstvo nam je predstaviti Zbornik radova desetog, jubilarnog, skupa mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti. Ova publikacija zbir je radova izlagača na skupu održanom 14. – 17. rujna 2023. god. na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu.

Ideja o kreiranju ovakvog tipa skupa krenula je prije 10 godina upravo iz Splita gdje su i održani prvi *Zajednički temelji* te se od tada kontinuirano, svake godine, održavaju naizmjenice na ograncima Udruge hrvatskih građevinskih fakulteta (Zagreb, Split, Rijeka, Osijek i Mostar). Kroz dosadašnje susrete preko 250 mladih istraživača predstavilo je svoj rad i područje istraživanja. Tijekom formalnog dijela (prezentacije radova) i neformalnih druženja sudionici skupa imaju priliku upoznati kolege s drugih institucija te stvoriti preduvjete za povezivanje i daljnju suradnju.

Leonardo da Vinci je svojim crtežom "Vitruvijevog čovjeka" prikazao čovjeka kao mjeru za sve tj. kao polazište i središte svega. Vođeni željom da se u središte akademske zajednice postavi mladi znanstvenik, kao mjera i primjer, pokrenuti su upravo i *Zajednički temelji*. Kako se navedeni skup već iz godine u godinu uspješno i opetovano održava istodobno ispunjavajući svoje osnovne postavke uz konstantnu nadogradnju i rast, koji su rezultat zalaganja i doprinosa svih fakulteta domaćina skupa u proteklom vremenu, smatramo da smo alkarskim rječnikom; pogodili "u sridu".

Navedeno ne bi bilo moguće bez brojnih izlagača i kolega uključenih u organizaciju dosadašnjih inačica *Zajedničkih temelja* koji su svojim zalaganjem i radom utkali dio sebe u ovu ideju te joj omogućili rast i razvoj u tradicionalni godišnji skup. Ovim putem želimo se zahvaliti svima koji su nesebično dali svoj obol, te motivirati sve buduće kolege koji će omogućiti nastavak ove ideje.

Također potrebno je spomenuti i partnere iz gospodarstva i javnog sektora koji su, kako u ovoj inačici, tako i u svim dosadašnjim prepoznali našu ideju, te je podržali i na taj način omogućili nam ispunjavanje svih predviđenih aktivnosti.

Na kraju, zahvalili bismo dekanima fakulteta Udruge hrvatskih građevinskih fakulteta, koji su svaki u svoje vrijeme podržali pojedinu inačicu skupa u vidu domaćinstva, kao i svaku pojedinu (godišnju) inačicu skupa kao sudionici, omogućivši na taj način temeljni preduvjet za tok ove ideje.

*Zajedničkim temeljima* želimo dug i uspješan život, a svim mladim istraživačima uspješan rast i razvoj u svojoj karijeri!

*Zdravi i veseli bili!*

Predsjednik Organizacijskog odbora

Dr.sc. Ante Buzov

## SPONZORI I DONATORI



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA

### Udruga hrvatskih građevinskih fakulteta

Fra Andrije Kačića Miošića 26,  
10 000 Zagreb, Hrvatska  
[pubweb.carnet.hr/uhgf](http://pubweb.carnet.hr/uhgf)



Hrvatska komora  
inženjera građevinarstva

### Hrvatska komora inženjera građevinarstva

Ulica grada Vukovara 271 (Chromosov toranj)  
10 000 Zagreb, Hrvatska  
[www.hkig.hr](http://www.hkig.hr)



GRAĐEVINSKA LJEPILO • SISTEMI ZA BRTVLJENJE  
KEMIJSKI PROIZVODI ZA GRADITELJSTVO

### Mapei Croatia d.o.o.

Purgarija 14 - Kerestinec,  
10 431 Sveta Nedjelja, Hrvatska  
[www.mapei.com/hr](http://www.mapei.com/hr)

Zračna luka  Split

### Zračna luka Split d.o.o.

Cesta dr. Franje Tuđmana 1270,  
21 217 Kaštel Štafilić, Hrvatska  
[www.split-airport.hr](http://www.split-airport.hr)

**STRABAG**

### STRABAG d.o.o

Ulica Petra Hektorovića 2,  
10 000 Zagreb, Hrvatska  
[www.strabag.hr](http://www.strabag.hr)



**Wienerberger d.o.o.**  
Bani 75  
10 010 Zagreb, Hrvatska  
[www.wienerberger.hr](http://www.wienerberger.hr)



**Würth-Hrvatska d.o.o.**  
Lužec 1,  
49 214 Veliko Trgovišće, Hrvatska  
<https://eshop.wuerth.com.hr>



**SPEGRA d.o.o.**  
Ante Petravića 23,  
21000 Split, Hrvatska  
<https://spegra.hr>



**GEOTEHNIČKO  
PROJEKTIRANJE**  
*za savjetovanje i usluge*

**Geotehničko projektiranje d.o.o.**  
Ulica Ivana Gundulića 26  
21 000 Split, Hrvatska  
[www.geo-pro.hr](http://www.geo-pro.hr)



**HNK HAJDUK SPLIT**  
8. Mediteranskih igara 2,  
21 000 Split, Hrvatska  
<https://hajduk.hr>





**SPLITSKO  
DALMATINSKA  
ŽUPANIJA**

**SPLITSKO-DALMATINSKA ŽUPANIJA**

Domovinskog rata 2,  
21 000 Split, Hrvatska

<https://www.dalmacija.hr>



**Split**  
*Tourist Board of Split*  
TURISTIČKA ZAJEDNICA

**TURISTIČKA ZAJEDNICA GRADA SPLITA**

Obala Hrv. narodnog preporoda 9,  
21 000 Split, Hrvatska

<https://visitsplit.com>



**HERING d.d. za projektiranje i graditeljstvo  
ŠIROKI BRIJEG**

Provo bb,  
88 220 Široki Brijeg, BiH

[www.hering.ba](http://www.hering.ba)



**Toding d.o.o.**

Havidičeva 4,  
10 010 Zagreb, Hrvatska

[www.toding.hr](http://www.toding.hr)



**TBG Beton d.o.o. Zagreb**

Ivana Lučića 2A/10,  
10 000 Zagreb, Hrvatska

[www.tbgroup.hr](http://www.tbgroup.hr)



STUDENSKI ZBOR  
SVEUČILIŠTA U SPLITU

**STUDENSKI ZBOR  
SVEUČILIŠTA U SPLITU**

Ulica Ruđera Boškovića 31,  
21 000 Split, Hrvatska

**<https://www.szst.unist.hr>**



## SADRŽAJ

Predgovor .....	4
Ispitivanje ziđa flat-jack metodom L. Lulić, M. Stepinac .....	14
Određivanje mogućnosti georadara u ocjeni stanja konstrukcija K. Tešić, A. Baričević, M. Serdar .....	20
Mogućnosti primjene modela zasnovanih na agentima u hidraulici okolišnoga inženjerstva T. Kulić, G. Lončar .....	26
Scan-to-4D BIM u planiranju i izvedbi građevinskih projekata H. Begić .....	32
Umijeće ratovanja u upravljanju građevinskim projektima D. Obradović .....	38
Utjecaj tretmana gumenog agregata na mehanička svojstva cementom stabiliziranog nosivog sloja s otpadnom gumom M. Zvonarić .....	44
Utjecaj vlage i procesa pečenja na zaštitu pune opeke od elektromagnetskog neionizirajućeg zračenja I. Vrdoljak, I. Miličević, S. Rupčić .....	50
Primjena odabranih modela puzanja kod lijepjenih lameliranih nosača od graba J. Lovrić Vranković, I. Boko, I. Uzelac Glavinić .....	56
Strojno učenje i daljinska istraživanja za mapiranje prometnica u Splitsko-dalmatinskoj županiji S. Knežić Buhovac, Lj. Šerić, A. Ivanda .....	62
Projektiranje autocesta prilagođenih prometu autonomnih vozila A. Čudina Ivančev, V. Dragčević, T. Džambas .....	68
Utjecaj temperature i trajanja opterećenja na ponašanje greda od laminiranog stakla G. Grozdanić, M. Galić .....	74
Poboljšanje pravilnika za projektiranje izvangradskih cesta s aspekta sigurnosti prometa B. Čutura, I. Lovrić .....	82
Analiza relativnih deformacija i naprezanja na mostu Vranduk 2 M. Jurišić, G. Šunjić, N. Bebek .....	90

Planiranje i programiranje istraživačkih prostora – modeli laboratorija prirodnih znanosti	
M. Džapo, B. Baletić, S. Bašić .....	96
Istraživanje urbanističkog razvoja Kune Pelješke	
E. Tomelić .....	102
Pregled i primjena metoda operacionalne modalne analize u frekvencijskoj domeni	
J. Pajan, I. Duvnjak, S. Ereiz .....	108
Analiza prirodnih frekvencija 2D mikropolarnog kontinuuma	
L. Grbac, G. Jelenić.....	114
Numerički model za identifikaciju parametara mikro-armiranog betona	
T. Sulovsky, I. Kožar, M. Plovanić .....	120
Vankomicin rezistentni <i>Enterococcus faecium</i> u priobalnim vodama istočnog jadrana	
M. Dželalija, M. Kvesić, A. Maravić.....	128
Procjena rubnih uvjeta grede korištenjem metode najstrijemijeg spusta	
I. Kožar, M. Plovanić, T. Sulovsky .....	136
Numerički proračuni međudjelovanja fluida i konstrukcije	
A. Bakica.....	140
Obalna ranjivost i plavljenje naselja kao posljedica podizanja morske razine	
A. Tadić, I. Ružić, Č. Benac, N. Krvavica, D. Jakupović, G. Ljubičić, V. Petrović .....	146
Aspekti kvalitete dobrovoljnih geoinformacija u kriznim situacijama	
M. Tavra.....	152
Varijabilnost očekivane godišnje štete kao indikatora poplavnog rizika	
T. Kekez.....	158







## ISPITIVANJE ZIDA FLAT-JACK METODOM

Luka Lulić<sup>1</sup>, Mislav Stepinac<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, Hrvatska, [luka.lulic@grad.unizg.hr](mailto:luka.lulic@grad.unizg.hr), [mislav.stepinac@grad.unizg.hr](mailto:mislav.stepinac@grad.unizg.hr)

### Sažetak

Nedavni seizmički događaji koji su protresli Hrvatsku naglašavaju potrebu za obnovom značajnog broja postojećih građevina. Veliki dio njih spada među ranjive nearmirane zidane konstrukcije. Kako bi obnova i pojačanje takvih konstrukcija bili efikasni i održivi, potrebno je provesti detaljne istražne radove u procesu ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije korištenjem raznih metoda. Flat-jack metoda pokazala se kao vrlo korisna polurazorna metoda ispitivanja. Ona pomoću plosnatih preša unosi naprezanje u zide te posljedično uzrokuje njegovu deformaciju. Mjerenjem spomenutih naprezanja i deformacije te obradom dobivenih podataka osigurava se uvid u mehanička svojstva zida. Kroz tri faze ispitivanja mogu se odrediti vertikalno stanje naprezanja, modul elastičnosti i početna posmična čvrstoća zida.

*Ključne riječi: zide, potres, flat-jack, obnova*

## FLAT-JACK METHOD FOR TESTING MASONRY

### Abstract

The recent seismic events that shook Croatia made it clear that there is a great need for the renovation of a significant number of existing buildings. A large portion of these are vulnerable buildings made of unreinforced masonry. In order to make the renovation and strengthening of such structures efficient and sustainable, detailed investigations must be conducted to assess the existing condition of the structure. Various methods are used for this purpose. The flat-jack method has been proven to be a very useful semi-destructive testing method. Flat-jacks are used to apply stress to the masonry, causing it to deform. An insight into the mechanical properties of the masonry is acquired by measuring the aforementioned stresses and deformations and processing the measured data. The vertical stress state, the modulus of elasticity, and the initial shear strength of the masonry can be determined during the three test phases.

*Keywords: masonry, earthquake, flat-jack, renovation*



## 1. Uvod

Hrvatski građevinski fond sastoji se velikim dijelom od nearmiranih zidanih konstrukcija koje su posebno ranjive u seizmičkim područjima [1]. Mnoge od njih su pred istekom projektiranog uporabnog vijeka [2]. Nedovoljno održavanje te nepravilne rekonstrukcije nepovoljno je utjecalo na sigurnost takvih konstrukcija te su trenutno u stanju nedostatne mehaničke otpornosti i stabilnosti. Kada uzmemo u obzir i potresni rizik, situacija postaje još ozbiljnija, oogotovo nakon nedavnih snažnih potresa koji su dodatno pogoršali situaciju dodatnim oštećenjima i degradacijom mehaničkih svojstava [3]. Sve navedeno naglašava važnost obnove takvih građevina. Kako bi obnova i daljnje upravljanje postojećim građevinskim fondom bilo što efikasnije, potrebna je kvalitetna procjena postojećeg stanja građevinske konstrukcije. Upravo spomenutom tematikom bavi se znanstveni projekt ARES: *Procjena stanja i obnova postojećih građevina – Razvoj suvremenih metoda za zidane i drvene konstrukcije* [4]. U procesu procjene postojećeg stanja važnu ulogu imaju istražni radovi. Pri tome se koriste razne nerazorne, polurazorne i razorne istražne metode. Među najkorištenijima su flat-jack metoda, posmični test, modalna analiza, ispitivanje tlačne čvrstoće opeke, sklerometar za mort i dijagonalni vlačni test [5]. U nastavku rada je detaljnije objašnjena flat-jack metoda.

## 2. Flat-jack metoda

Metoda se sastoji od nekoliko faza koje se mogu provoditi u kontinuitetu jedna iza druge ili pojedinačno, neovisno jedna od druge. Ovisno o fazi, koriste se jedan ili dva flat-jacka (plosnata preša) koja se umetnu u ziđe. Povećanjem pritiska u prešama dio pritiska se prenosi na ziđe što dovodi do njegove deformacije. Promatranjem pritiska i deformacije te obradom podataka dolazi se do nekoliko korisnih mehaničkih svojstava ziđa. To su vertikalno stanje naprezanja, ponašanje ziđa u tlaku (odnos naprezanje-deformacija) odnosno modul elastičnosti te početna posmična čvrstoća i koeficijent trenja. U nastavku su detaljnije prikazane sve 3 faze ispitivanja.

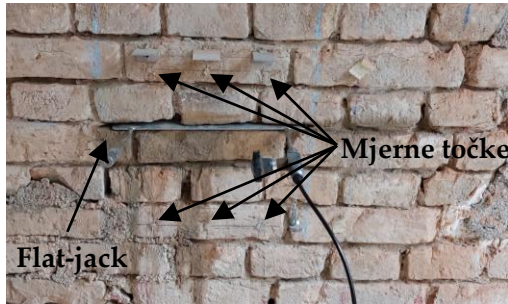
### 2.1. Proces kalibracija

Prije samog ispitivanja potrebno je provesti proces kalibracije. Svrha kalibracije je utvrditi postotak gubitka pritiska do kojeg dolazi zbog deformiranja čeličnih ploča flat-jacka. Kalibracija se provodi u laboratoriju na statičkoj preši minimalne nosivosti 10 tona. Detalji vezani za proces kalibracije dani su u američkim [6] i međunarodnim [7] smjernicama.

### 2.2. Vertikalno stanje naprezanja

Nakon kalibracije može se pristupiti prvoj fazi ispitivanja (Slika 1.) kojom se određuje vertikalno stanje naprezanja u ziđu na mjestu ispitivanja. Za to se koristi jedan flat-jack. Uz to potrebno je zalijepiti mjerne toče u parovima iznad i ispod lokacije flat-jacka. One će služiti za mjerenje njihove udaljenosti tijekom ispitivanja kako bi pratili deformiranje ziđa. Mjerenje se vrši pomoću prijenosnog komparatora rezolucije tisućinke milimetra. Cilj je izmjeriti inicijalnu udaljenost mjernih točaka prije izrade otvora te ponoviti mjerenje nakon izrade otvora kako bismo dobili progib ziđa zbog novonastalog diskontinuiteta u materijalu i relaksacije naprezanja. Zatim se u otvor umetne flat-jack u kojem se postepeno povećava pritisak. Kako pritisak raste, flat-jack se

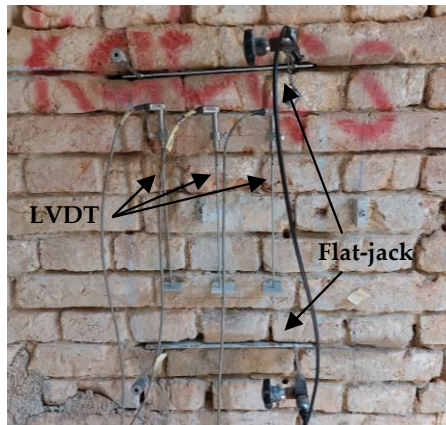
deformira i prenosi dio naprezanja na zidu. Zidu se, također, počinje deformirati i polako vraćati u inicijalni položaj. Kada se zid vrati u inicijalni položaj, zabilježi se pritisak u flat-jacku. Taj pritisak se korigira koeficijentom dobivenim u postupku kalibracije i koeficijentom koji uzima u obzir veličinu otvora te predstavlja stanje vertikalnog naprezanja u zidu. Smjernice za ovu fazu ispitivanja mogu se pronaći u [6], [7].



Slika 1. Određivanje vertikalnog naprezanja

### 2.3. Odnos naprezanje-deformacija

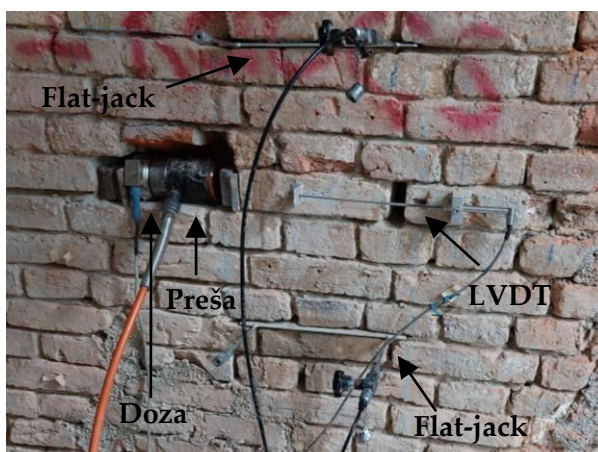
Druga faza ispitivanja (Slika 2.) koristi dva flat-jacka postavljena jedan iznad drugoga te vertikalno postavljene senzore pomaka (LVDT). Tako se dobije dio zida koji se nalazi u području jednolikog tlačnog naprezanja koje se može kontrolirati. Postepeno povećanje pritiska i mjerenje pomaka rezultira odnosom naprezanje-deformacija koji opisuje ponašanje zida u tlaku. Iz dobivenog odnosa moguće je odrediti modul elastičnosti koji se dobije iz omjera naprezanja i deformacije. Kada spomenuti omjer krene naglo padati, ispitivanje se prekida kako zid ne bi ušlo u plastično područje gdje dolazi do oštećenja. Detaljnije informacije o određivanju modula elastičnosti nalaze se u [8], [9].



Slika 2. Određivanje modula elastičnosti

## 2.4. Posmični test s kontrolom vertikalnog naprezanja

Treća i zadnja faza ispitivanja (Slika 3.) koristi do sada korištena dva flat-jacka kojim se dodaje i treća horizontalna standardna preša (može se koristiti i mali flat-jack). Potrebno je odabrati jednu uzdužnu opeku između dva flat-jacka koja će se gurati s trećom prešom. Ispred odabrane opeke radi se otvor za treću prešu, a iza te opeke radi se drugi otvor kako bi opeka imala mjesta za pomak. Prvo se osigura određena razina vertikalnog pritiska te se zatim opeka gura horizontalno dok ne otkáže, odnosno dok ne prokliže. Zatim se razina vertikalnog protiska povećá te se opeka ponovo gurne dok ne prokliže. Isti postupak se ponovi na nekoliko razina vertikalnog pritiska. Kao rezultat dobije se odnos posmičnog naprezanja i vertikalnog naprezanja. Izmjerene točke povezujemo korelacijskim pravcem čiji nagib predstavlja koeficijent trenja, a odsječak na vertikalnoj osi predstavlja početnu posmičnu čvrstoću zida. Više informacija o završnoj fazi flat-jack ispitivanja može se naći u [10], [11].



Slika 3. Određivanje početne posmične čvrstoće

Detaljniji opis flat-jack metode, njene provedbe te određenih poteškoća za vrijeme provedbe ispitivanja dane su u [12]. Također, prikaz rezultata opsežne flat-jack studije provedene na postojećim nearmiranim zidanim konstrukcijama u Hrvatskoj može se pronaći u [13].

## 3. Zaključak

S ciljem efikasne i održive obnove potrebno je posebnu pažnju posvetiti ulaznim parametrima za proračun konstrukcije. Polurazorna flat-jack metoda predstavlja zahtjevnu, ali korisnu ispitnu metodu. Njenom provedbom osigurava se uvid u važna mehanička svojstva zida. Primjena ove metode korisna je u procjeni stanja postojećih zidanih konstrukcija, posebno u vrijeme obnove velikog broja građevina nakon nekoliko snažnih potresa koji su pogodili zagrebačko i petrinjsko područje.

## Literatura

- [1] Kišiček, T., Stepinac, M., Renić, T., Hafner, I., and Lulić, L., Strengthening of masonry walls with FRP or TRM, *Gradjevinar*, vol. 72, no. 10, pp. 937 – 953, 2020, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2983.2020>.
- [2] Stepinac, M., Kišiček, T., Renić, T., Hafner, I., and Bedon, C., Methods for the assessment of critical properties in existing masonry structures under seismic loads-the ARES project, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 5, 2020, doi: 10.3390/app10051576.
- [3] Stepinac, M., Lourenço, P. B., Atalić, J., Kišiček, T., Uroš, M., Baniček, M., and Šavor Novak, M., Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 56, p. 102140, 2021, doi: 10.1016/j.ijdr.2021.102140.
- [4] ARES, ARES Project official website, Jun. 26, 2020. <https://www.grad.hr/ares/>
- [5] Krolo, J., Damjanović, D., Duvnjak, I., Smrčić, M. F., Bartolac, M., and Koščak, J., Methods for determining mechanical properties of walls, *Gradjevinar*, vol. 73, no. 2, pp. 127 – 140, 2021, doi: 10.14256/JCE.3063.2020.
- [6] ASTM., ASTM C1196 - 09: Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements. 2009.
- [7] RILEM, RILEM Recommendation MDT. D. 4: In-situ stress tests based on the flat jack, *Materials and Structures*, vol. 37, no. 7. pp. 491 – 496, 2004.
- [8] ASTM, ASTM C1197 - 14a: Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method. 2014.
- [9] RILEM., RILEM Recommendation MDT. D. 5: In-situ stress - strain behaviour tests based on the flat jack, *Materials and Structures*, vol. 37, no. September 2004. pp. 497 – 501, 2005.
- [10] ASTM, ASTM C1531 - 16: Standard Test Methods for In Situ Measurement of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index, *Changes*, vol. 04. pp. 1 – 7, 2003.
- [11] RILEM., RILEM Recommendations MS-D.6: In-situ measurement of masonry bed joint shear strength, *Materials and Structures*, vol. 29. pp. 459 – 475, 1996.
- [12] Lulić, L., Stepinac, M., Bartolac, M., and Lourenço, P. B., Review of the flat-jack method and lessons from extensive post-earthquake research campaign in Croatia, *Constr Build Mater*, vol. 384, p. 131407, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131407.
- [13] Stepinac, M., Lulić, L., Damjanović, D., Duvnjak, I., Bartolac, M., and Lourenço, P. B., Experimental Evaluation of Unreinforced Brick Masonry Mechanical Properties by the Flat-Jack Method – an Extensive Campaign in Croatia, *International Journal of Architectural Heritage*, pp. 1–18, May 2023, doi: 10.1080/15583058.2023.2208542.





## ODREĐIVANJE MOGUĆNOSTI GEORADARA U OCJENI STANJA KONSTRUKCIJA

Ksenija Tešić<sup>1</sup>, Ana Baričević<sup>1</sup>, Marijana Serdar<sup>1</sup>

(1) *University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, [ksenija.tesic@grad.unizg.hr](mailto:ksenija.tesic@grad.unizg.hr), [ana.baricevic@grad.unizg.hr](mailto:ana.baricevic@grad.unizg.hr), [marijana.serdar@grad.unizg.hr](mailto:marijana.serdar@grad.unizg.hr)*

### Sažetak

Ocjena stanja konstrukcija nerazornom metodom georadar (GPR) temelji se na analizi jakosti, predznaka i oblika reflektiranog signala od objekte ispod ispitivane površine. Stoga se koristi za lociranje armature u armiranobetonskim konstrukcijama, određivanje vrste i strukture konstruktivnih elemenata, ocjenu korozije armature, itd. U ovom radu prikazana je primjenjivost georadara za lociranje armature i određivanje geometrije konstruktivnih elemenata, kao i studija o osjetljivosti signala georadara na parametre korozije izazvane kloridima.

*Ključne riječi: georadar, beton, ocjena stanja, korozija*

## IDENTIFYING THE CAPABILITIES OF GROUND PENETRATING RADAR IN STRUCTURAL CONDITION ASSESSMENT

### Abstract

The condition assessment of structures using the non-destructive ground penetrating radar (GPR) method is based on the analysis of the strength, sign and shape of the signal reflected from the objects under the examined surface. Therefore, it is used for locating reinforcement in reinforced concrete structures, determining the type and structure of structural elements, evaluating the corrosion of reinforcement, etc. This paper presents the applicability of the GPR method for locating reinforcement and determining the geometry of structural elements, as well as the study of the sensitivity of the GPR signal to chloride-induced corrosion parameters.

*Keywords: ground penetrating radar, concrete, condition assessment, corrosion*

## **1. Introduction**

After the earthquake that struck Zagreb in March 2020, an estimated 25,000 buildings were affected by this natural disaster. Buildings constructed before the implementation of modern seismic regulations [1] were particularly vulnerable to damage. According to [2], more than 85% of buildings in Zagreb's Downtown were built more than 50 years ago. In addition to the magnitude of seismic activity, the lack of regular maintenance of these aged buildings significantly contributed to the extent of damage. Such disasters highlighted the importance of regular and thorough inspection. The use of non-destructive techniques is highly desirable, especially for historically significant listed buildings [3–6].

In the last two decades, one of the most commonly used non-destructive techniques has been ground penetrating radar (GPR). GPR is based on the emission and detection of electromagnetic waves [7, 8] reflected from layers, edges or objects in structural elements. The technique is mainly used in reinforced concrete structures, although, with increasing knowledge and experience, GPR is also used in the inspection of structures made of other materials [9, 10].

This paper presents examples, results, and conclusions from research conducted as part of ASAP [11], a four-year project to develop a robotic system equipped with GPR for the inspection of structures.

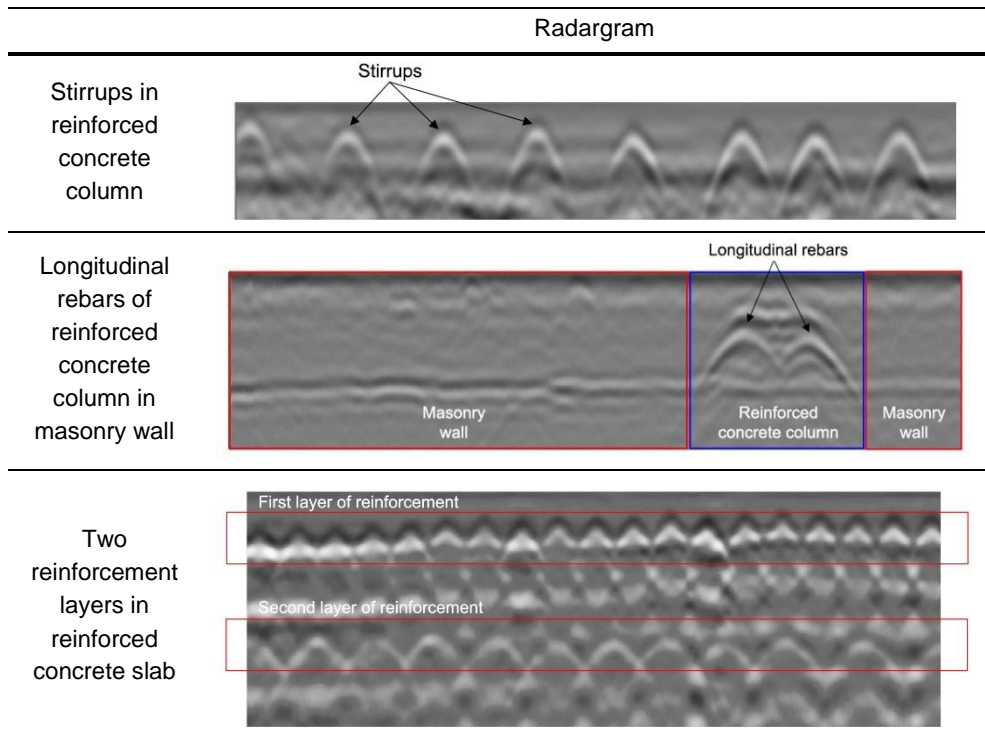
## **2. Application of GPR in the structural assessment**

### **2.1. Reinforcement in concrete structures**

One of the most common applications of GPR in the condition assessment of concrete structures is the derivation of information about the location of reinforcement in structural elements. The analysis is based on the detection of reflections from the top of the reinforcing bars, which determine their position and the distance between them. The GPR used in the inspection of structures is usually a hand-held device on wheels, where the encoder measures the distances in the inspection direction. In order to determine the depth of the reinforcing bars, the correlation between the time the wave passes through the concrete and the speed of the wave must be established. On the other hand, the wave velocity depends on the dielectric permittivity of the concrete, which can be measured by other techniques, estimated from literature values [12] or derived from the GPR measurement of an object with known depth.

The examples of radargrams obtained in the GPR determination of reinforcement location are given in Table 1. It should be mentioned that the direction of the radargram is perpendicular to the direction of the rebar of interest.

**Table 1.** The specific radargrams of the reinforcement investigations in concrete structures.



The advantages of GPR over other non-destructive methods for determining the position of reinforcement in reinforced concrete structures are its relatively high accuracy at large penetration depths (up to 60 cm) and the simultaneous investigation of other properties of the element, e.g., concrete cover and element thickness and composition of the structural element. Disadvantages include advanced signal processing in certain cases, knowledge of the principles of electromagnetic theory and inaccurate results in the case of congested objects.

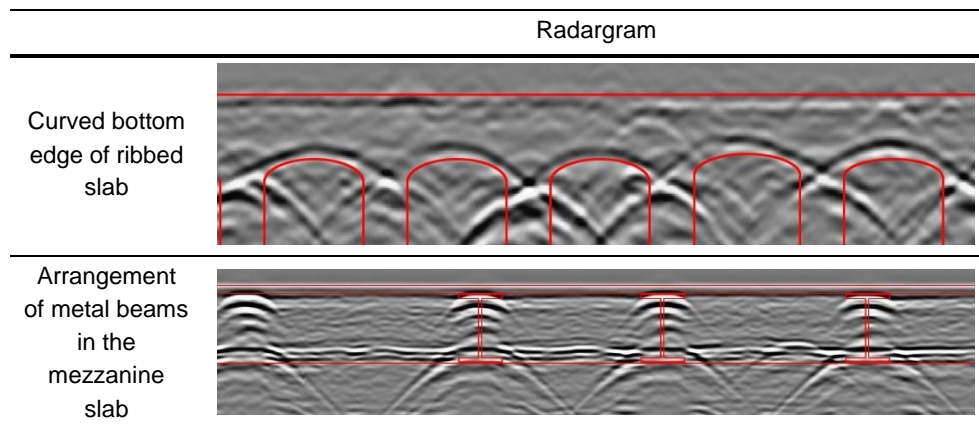
## 2.2. Geometry of structural elements

Aside from the position of reinforcement in concrete structures, the GPR could be used to determine the geometry of structural elements. The geometry is analyzed based on the strength, phase, and travel time of reflected waves. Examples of radargrams are given in Table 2.

The limitations of using GPR to determine the geometry of structural elements lie in the complicated geometry with many reflections from different objects and materials. In addition, as the depth of the element increases, the analysis becomes more complicated as the reflection of the object begins to disappear. Some of the problems mentioned could be overcome with additional signal processing.



**Table 2.** The specific radargrams from the geometry investigations of structural elements.



### 2.3. Corrosion of reinforcement

One of the most difficult but potentially very valuable tasks is the evaluation of the corrosion of reinforcement in reinforced concrete structures based on the GPR signal. The analysis is based on observing the change in signal amplitude as a result of the change in concrete and reinforcement due to the corrosion process. The change in the signal can be roughly divided into 1) changes due to material changes and 2) changes on the reinforcement surface. The former is related to the changes in the dielectric permittivity, electrical conductivity, and magnetic permeability of concrete as a material. The agents responsible for certain types of corrosion, such as moisture and chlorides, as well as corrosion products, e.g., rust, change the material properties, which in turn change the signal strength. The second reason is the change in the reflection coefficient, as the reflective surface changes due to the accumulation of corrosion products on the top of the reinforcement.

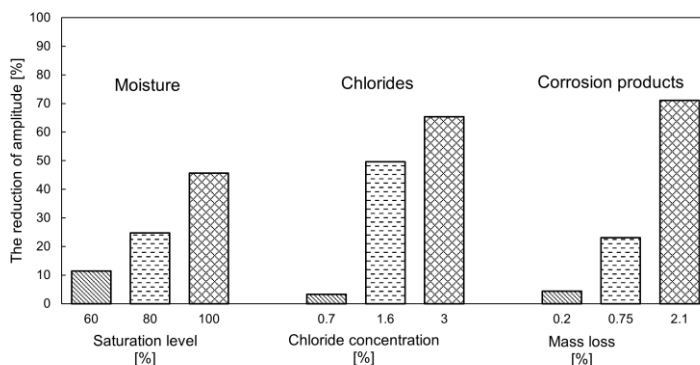


Figure 1. Comparison of the effect of corrosion-related attributes on GPR amplitude.

The comparison of the effects of moisture, chlorides, and corrosion products on the change in GPR signal amplitude is shown in Figure 1. These are the results of the laboratory study on reinforced concrete specimens where the rebar was embedded in the concrete 5 cm from the inspected surface. On the left side of the diagram, the effect of increasing the saturation level from 50% to 60%, 80% and 100% on the signal amplitude is shown. The middle of the diagram shows the effect of increasing the mean chloride concentration in the concrete cover to 0.7, 1.6 and 3% of the cement mass at a fixed saturation level of 80%. The right side of the graph shows the effect of 0.2%, 0.75% and 2.1% mass loss of reinforcement due to corrosion, without chlorides, under ambient laboratory conditions.

Any increase in the observed effect, i.e., an increase in the degree of saturation, chloride concentration, or accumulation of corrosion products, results in a decrease in amplitude. The increase in the degree of saturation in concrete leads to dipolar polarization effects [13], which are associated with a loss of amplitude due to the rotation of water molecules in the electromagnetic field. The increase in chloride concentration increases the conductivity of the concrete [14], resulting in amplitude loss due to the collision of the dissolved ions in the pore water in the presence of the emitted electromagnetic signal. The corrosion products migrating into the concrete pores change the magnetic permeability [15], which further enhances the amplitude reduction.

The analysis of the corrosion state by means of GPR becomes very demanding when all the above parameters change the GPR amplitude simultaneously.

### 3. Conclusion

This paper presents the results of the research carried out within the project ASAP on the application of ground penetrating radar for the condition assessment of structures. GPR is a very valuable non-destructive technique due to its wide range of applications in the inspection of structures. However, apart from its main purpose of locating metallic objects below the surface, the analysis of the results in other cases is challenging and requires knowledge of signal processing and electromagnetic theory.

### ACKNOWLEDGEMENT

This research was funded by the European Union through the European Regional Development Fund's Competitiveness and Cohesion Operational Program, grant number KK.01.1.1.04.0041, project "Autonomous System for Assessment and Prediction of Infrastructure Integrity (ASAP)".

### Literature

- [1] EN1998 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2001, doi.org/10.1680/cien.144.6.55.40618
- [2] Stepinac, M., Lourenço, P.B., Atalić, J., Kišiček, T., Uroš, M., Baniček, M., Šavor Novak, M.: Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020, International Journal of Disaster Risk Reduction, 56, 102140, 2021, doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102140

- [3] Solla, M., Riveiro, B.: *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure*, Taylor & Francis Group, 2016, doi.org/10.1201/b19024.
- [4] Pérez-Gracia, V., Caselles, O., Clapés, J., Osorio, R., Canas, J. A., Pujades, L. G.: Radar exploration applied to historical buildings: A case study of the Marques de Llió palace, in *Barcelona, Engineering Failure Analysis*, 16, pp. 1039 – 1050, 2009, doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.05.007
- [5] McCann, D.M., Forde, M.C.: Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures, *NDT & E International*, 34(2), pp. 71 – 84, 2001, doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00032-3
- [6] Tešić, K., Baričević, A., Serdar, M.: Comparison of cover meter and ground penetrating radar performance in structural health assessment: case studies, *Građevinar*, 73 (11), pp.1131-1144, 2021, doi.org/10.14256/JCE.3323.202
- [7] Daniels, D.J.: *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*, The Institution of Electrical Engineers, London, 2004, doi.org/10.1049/PBRA015E,
- [8] Annan, A.P.: *Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar*, in: M.H. Jol (Ed.), *Ground Penetrating Radar Theory Appl.*, Elsevier B.V, Amsterdam, The Netherlands, 2009, pp. 1–40, doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4.
- [9] Pérez-Gracia, V., Solla, M.: *Inspection Procedures for Effective GPR Surveying of Buildings*, in: Benedetto, A., Pajewski, L. (Ed), *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*, Springer, New York and London, 2015, pp. 97 - 124, doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0
- [10] Rodrigues, B.P., Senalik, C.A., Wu, X., Wacker, J.: Use of ground penetrating radar in the evaluation of wood structures: A review, *Forests*, 12, 2021, doi.org/10.3390/f12040492
- [11] Serdar, M., Damjanović, D., Švaco, M., Jerbić, B., Orsag, M., Kovačić, Z.: Development of an autonomous system for assessment and prediction of structural integrity, *Građevinar*, 73 (12), pp. 1173-1184, 2021, doi.org/10.14256/JCE.3390.2021
- [12] Cassidy, N.J.: *Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids*, in: H.M. Jol (Ed.), *Ground Penetrating Radar Theory Appl.*, Elsevier B.V, Amsterdam, The Netherlands, 2009, pp. 41–72, doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00002-8
- [13] Sbartai, Z.M., Laurens, S., Balayssac, J.P., Ballivy, G., Arliguie, G.: Effect of concrete moisture on radar signal amplitude, *ACI Materials Journal*, 103, pp. 419 – 426, 2006, doi.org/10.14359/18219
- [14] Kim, S., Kang, J., Lee, S.H., Ahn, Y.H.: Effect of Chlorides on Conductivity and Dielectric Constant in Hardened Cement Mortar: NDT for Durability Evaluation, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016, doi.org/10.1155/2016/6018476
- [15] Cassidy, N.J.: Frequency-dependent attenuation and velocity characteristics of nano-to-micro scale, lossy, magnetite-rich materials, *Near Surface Geophysics*, 6, pp. 341 – 354, 2008, doi.org/10.3997/1873-0604.2008023.



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.06>

## MOGUĆNOSTI PRIMJENE MODELA ZASNOVANIH NA AGENTIMA U HIDRAULICI OKOLIŠNOGA INŽENJERSTVA

Tin Kulić<sup>1</sup>, Goran Lončar<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb,  
[tin.kulic@grad.unizg.hr](mailto:tin.kulic@grad.unizg.hr), [goran.loncar@grad.unizg.hr](mailto:goran.loncar@grad.unizg.hr)

### Sažetak

Svjedoci smo izraženog napretka na polju razvoja softvera i računalnih komponenti koji se koriste pri izradi numeričkih modela i simulacija raznih prirodnih procesa i promjena u ekosustavima. Konvencionalne metode modeliranja često ne uzimaju u obzir određena stanja sustava koja proizlaze kao posljedica procesa nastalih prilikom interakcije njegovih dionika. Upravo se modeliranje zasnovano na agentima (eng. *Agent-based modelling*, ABM) ističe kao pristup modeliranju sustava na razini jedinice (agent) i makroskopskoj razini na koju značajno utječu opisane interakcije s agentima. Ovaj rad daje pregled područja primjene ABM-a pri čemu je fokus stavljen na okolišno inženjerstvo i s njim povezanu hidrotehničku problematiku. Kroz same primjere pokušat će se približiti mogućnosti korištenja ABM-a kao pristupa modeliranju koji može nadograditi konvencionalne metode modeliranja te doprinijeti razvoju sektora građevinarstva.

*Ključne riječi: okolišno inženjerstvo, hidrotehnika, modeliranje zasnovano na agentima*

## THE POSSIBILITIES OF THE APPLICATION OF AGENT-BASED MODELS IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING HYDRAULICS

### Abstract

Nowadays, we are witnessing a continuous evolution of software modules as well as computational components used to build numerical models to simulate various natural processes and changes in ecosystems. Conventional modelling techniques usually do not take into account certain system states resulting from the processes stimulated by the interactions between its stakeholders. Agent-based modelling (ABM) is a modelling approach that considers individual (agents) and macroscopic (environment) levels of the system, the latter being influenced by the interactions with the agents. This paper will give an overview of the different applications of ABM, using water-related problems in environmental engineering as an example. The authors will attempt to illustrate the possibilities of ABM applications through several examples to show how such models can enhance conventional modelling methods and contribute to civil engineering.

*Keywords: environmental engineering, water science, agent-based modelling*

## 1. Uvod

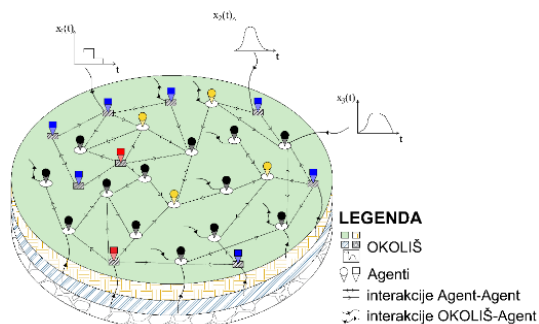
Kontinuirani razvoj softverskih alata i računalnih komponenti daje nam mogućnost analize sve kompleksnijih problema koji se tiču različitih područja znanosti i industrije. Pri tome, valja istaknuti pojam interdisciplinarnosti koji podrazumijeva sagledavanje problematike sa stajališta više struka te donošenja najpovoljnijega jedinstvenog ili, pak, varijantnih rješenja. Upravo pri analizi raznovrsne problematike, osobito u okolišnom inženjerstvu, primjenjuju se matematički modeli kao alati kojima se približno opisuju pojave, procesi i karakteristike određenog sustava rješavanjem matematičkih jednadžbi. Što se, pak, samih matematičkih modela tiče, ovaj će se rad baviti upravo jednom vrstom stohastičkog modela u okviru kojeg rješenje razmatranih procesa i promjena u sustavu nije jedinstveno, već je moguće odrediti vjerojatnosti pojave novih stanja sustava [1].

U kontekstu prethodno diskutiranoga modeliranje zasnovano na agentima (eng. *Agent-based modelling*, dalje u tekstu: ABM) ističe se kao pristup modeliranju sustava koji se sastoje od autonomnih i interaktivnih agenata. ABM omogućuje modeliranje dinamike kompleksnih adaptabilnih sustava u okviru kojih se promatraju posljedice ponašanja i interakcije agenata [2], [3]. Sama definicija ABM-a upućuje na to da je ovaj pristup primjenjiv u svakoj problematici u kojoj je izražen stohastički karakter vladajućih procesa. Abar i sur. [4] dali su iscrpni pregled područja primjene ABM-a kao i odgovarajuće softverske podrške. Datta i sur. [5] te Hoertel i sur. [6] proveli su analizu utjecaja primjene mjera protiv širenja COVID-19 virusa na povećanje broja zaraženih ljudi i njihove hospitalizacije. U navedenim su radovima prikazane studije slučaja na realnim primjerima širenja pandemije u New Yorku i Francuskoj. Nadalje, ABM je svoju primjenu pronašao i u analizi burzovnoga tržišta, tržišta rada te druge ekonomske problematike [7], [8], zatim prometnoga toka i procjene vremena putovanja [9], kombinacije različitih vrsta prometa u okviru sustava za potporu pri odlučivanju vezanog za planiranje vrste transporta [10]. Razvidno je da ABM pronalazi svoju primjenu u raznovrsnim industrijskim i znanstvenim područjima što dovodi, u konačnici, do problematike koja se tiče ovoga rada, a odnosi se na okolišno inženjerstvo. Sam pojam okolišnog inženjerstva obuhvaća široki spektar struka, dok je ovdje fokus na hidrotehničkoj problematici. Osim primjera primjene ABM-a u okviru okolišnoga inženjerstva, ovim će se radom dati uvid u opće značajke ABM-a te prednosti koje donosi integracija ABM-a s hidrodinamičkim (dalje u tekstu: HD) modelima.

## 2. Modeliranje zasnovano na agentima – ABM

### 2.1. Elementi ABM-a

Svaki ABM sastoji se od tri elementa: agenata, okoliša i interakcija na relaciji agent-okoliš i agent-agent [2], [3], [11]. Shematski prikaz strukture ABM-a dan je grafički u nastavku pri čemu je odgovarajućim simbolom označen pojedini element.



**Slika 1.** Shematski prikaz strukture ABM-a (prilagođeno prema [12])

Radovi Grimma i sur. [2], Macala i Northa [3] te Epsteina [11] daju detaljan opis pojedinog elementa ABM-a od čega su u nastavku izdvojene najbitnije značajke. Prvi element odnosi se na skup analiziranih agenata koji su autonomni uzimajući u obzir druge entitete koji se nalaze unutar simuliranog okoliša. Drugi element odnosi se na simulirani okoliš unutar kojeg se nalaze agenti te se odvijaju određene pojave definirane dvama tipovima interakcija – agent-okoliš, agent-agent. Okoliš mogu činiti određeni resursi, pasivni objekti ili nekakva globalna svojstva sustava koji se modelira. Potrebno je posebnu pozornost posvetiti modeliranju okoliša s obzirom na to da nam pouzdanost ABM-a ovisi upravo o pouzdanosti ovoga elementa, odnosno procesa koji ga opisuju te direktno utječu na promjene u gibanju i/ili ponašanju agenata. Posljednji, treći element, odnosi se na opisivanje međusobne interakcije agenata te agenata i okoliša u kojem se nalaze. Ovaj je element definiran određenim matematičkim jednadžbama i logičkim formulacijama.

## 2.2. Primjena ABM-a u hidraulici okolišnoga inženjerstva

U sklopu ovoga poglavlja dat će se uvid u dosad razvijene ABM-ove vezane uz analizu ponašanja i kretanja organizama u HD okruženju. Pri tome, primjerima će se obuhvatiti uspostavljeni ABM-ovi sustava u kojima agenti predstavljaju ili živi svijet, ili objekte. Također, ukratko će se opisati primjeri izvornih ABM-a koje su razvili autori ovoga rada [13], [14].

U okviru primjene ABM-a za potrebe modeliranja pronosa mikroorganizama, poput planktonskih zajednica i ličinki, uobičajeno je korištenje principa superjedinke (eng. *superindividual*) pri opisu njihovoga gibanja i drugih vladajućih procesa u modeliranome ekosustavu koji na njih utječu. Ovaj princip u obzir uzima jednu modelsku česticu koja predstavlja veći broj jedinki čiji su obrasci ponašanja sadržani upravo u matematičkoj formulaciji superjedinke [15]. U recentnim je radovima [16], [17], [18] pronos spomenutih mikroorganizama češće promatran prema principu pasivnih Lagrangeovih čestica, odnosno modelskih čestica čije je gibanje isključivo inducirano okolnim poljem strujanja fluida uz mogućnost vlastitoga tonjenja. Dakako, postoje istraživanja gdje je gibanje fitoplanktona promatran kroz princip aktivnih Lagrangeovih čestica, tj. modelskih čestica koje imaju sposobnost prilagođavanja promjenama u svome okolišu te suprotstavljanja okolnim djelovanjima poput struja fluida i gibanja u željenom smjeru [19]. Prijašnja su pak terenska uzorkovanja i istraživanja ovih vrsta u laboratorijskim uvjetima ukazala na izražene mogućnosti vertikalnoga gibanja jedinki planktonskih zajednica i ličinki s izraženim

bihavioralnim odgovorima na okolišne podražaje [20], [21], [22], [23]. Sukladno tome, Lončar i sur. [14] izradili su združeni HD model cirkulacije mora u akvatoriju luke Ploče i ABM pronosa ličinki. Ličinke (agenti) su modelirane kao aktivne čestice sa sposobnošću vertikalnoga plivanja u ovisnosti o prodoru intenziteta svjetlosti u stupac mora. Osim toga, definiran je set jednadžbi (interakcije na relaciji agent-okoliš, vidi poglavlje 2.1) na temelju kojih modelska čestica ostvaruje uvjete za naseljavanje dna u trenutku akumuliranja optimalne količine unutrašnje topline. U kontekstu ovoga ABM-a okoliš je predstavljen rezultatima HD modela i intenzitetom sunčeve svjetlosti na površini mora. Valja spomenuti i ProtectAS projekt [24] u okviru kojega je provedena analiza dinamike širenja planktonskih zajednica primjenom združenoga HD modela cirkulacije i ABM-a gibanja planktona u lukama Ploče i Rijeka.

ABM svoju primjenu pronalazi pri modeliranju gibanja kompleksnijih organizama poput riba pa će se u nastavku dati opis izvornog modela koji su razvili Kulić i sur. [14]. U istome su radu navedeni dosad razvijeni ABM-ovi koji se tiču tematike migracija i ponašanja riba izloženih HD utjecajima, stoga se neće detaljno obraditi u okviru ovoga rada. Izvorni ABM plivanja ribe uspostavljen je sa svrhom analize konfiguracija riblje staze s vertikalnim otvorima te odabira povoljnije s aspekta ostvarenja takvih uvjeta tečenja da dođe do što manjeg utroška energije agenta (ribe) pri uzvodnoj migraciji. Interakcije na relaciji agent-okoliš opisane su matematičkim jednadžbama pomoću kojih modelska čestica raspoznaje okolno polje strujanja (okoliš dobiven kalibriranim HD modelom) te mu se prilagođava kako bi što manje trošila energiju tijekom gibanja. Pod pojmom prilagodbe struji toka misli se na raspoznavanje smjera strujanja te promjenjivu brzinu gibanja agenta s obzirom na brzinu toka.

Posljednja kategorija primjera primjene ABM-a u okolišnom inženjerstvu odnosi se na modeliranje ljudi i kućanstava kao agenata izloženih djelovanju poplava. ABM je primijenjen za potrebe analize problematike evakuacije ljudi pri pojavi urbanih poplava [25]. Ovim je istraživanjem uključena komponenta ljudskoga faktora u modelsku formulaciju na temelju realnih snimki s nadzornih kamera pri čemu su izvučeni neki od obrazaca ponašanja poput grupiranja ili, pak, tendencije zadržavanja u blizini čvrstih predmeta. Nadalje, slična je tematika obrađena primjenom ABM-a pri analizi evakuacije ljudi uslijed pojave tsunamija [26]. Posljednji izdvojeni primjer odnosi se na istraživanje Yanga i sur. [27] koji su primijenili ABM u sklopu analize osjetljivosti kućanstava (agenata) na urbane poplave.

### **3. Zaključak**

ABM predstavlja relativno nov modelski pristup koji se primjenjuje za potrebe modeliranja dinamike kompleksnih adaptabilnih sustava pomoću autonomnih i interaktivnih agenata. Ovaj modelski pristup ima široki spektar primjene, a upravo je ovim radom dan pregled područja znanosti i realnoga sektora u kojima je moguća njegova primjena. Fokus rada stavljen je na primjenu ABM-a u okolišnom inženjerstvu s naglaskom na hidrotehničku problematiku uz opis primjera analize širenja planktonskih zajednica i ličinki, plivanja riba kroz riblje staze te ponašanja čovjeka izloženoga djelovanju poplava. Uzimajući u obzir činjenicu da se sve više poštuje načelo interdisciplinarnosti, što podrazumijeva uključivanje raznih struka u probleme vezanih uz građevinarstvo, ABM svakako predstavlja alat koji može nadograditi konvencionalne metode modeliranja i doprinijeti razvoju ovoga sektora.

**Zahvala:** Ovo istraživanje financirano je iz sredstava projekta Hrvatske zaklade za znanost (DOK-2020-01) i projekta ProtectAS (KK 05.1.1.02.0013).

## Literatura

- [1] Prirodoslovno matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu – Stohastičko modeliranje, <http://aktuari.math.pmf.unizg.hr/docs/sm.pdf>, 26.06.2023.
- [2] Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., Railsback, S.F.: The ODD protocol: A review and first update, *Ecological Modelling*, 221, pp. 2760-2768, 2005, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019
- [3] Macal, C.M., North, M.J.: Tutorial on agent-based modelling and simulation, *Journal of Simulation*, 4(3), pp. 151 – 162, 2010, doi: 10.1057/jos.2010.3
- [4] Abar, S., Theodoropoulos, G.K., Lemarinier, P., O'Hare, G.M.P.: Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software, *Computer Science Review*, 24, pp. 13-33, 2017, doi: 10.1016/j.cosrev.2017.03.001
- [5] Datta, A., Winkelstein, P., Sen, S.: An agent-based model of spread of a pandemic with validation using COVID-19 data from New York State, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 585, 2022, doi: 10.1016/j.physa.2021.126401
- [6] Hoertel, N., Blachier, M., Blanco, C., Olfson, M., Massetti, M., Sanchez Rico, M., Limosin, F., Leleu, H.: A stochastic agent-based model of the SARS-CoV-2 epidemic in France, *Nature Medicine*, 26, pp. 1417 – 1421., doi: 10.1038/s41591-020-1001-6
- [7] Hamill, L., Gilbert, N.: *Agent-Based Modelling in Economics*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester (West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom), 2016
- [8] Vanfossan, S., Dagli, C.H., Kwasa, B.: An Agent-Based Approach to Artificial Stock Market Modeling, *Procedia Computer Science*, 168, pp. 161 - 169, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.02.280
- [9] Heinrichs, M., Behrisch, M., Erdmann, J.: Just do it! Combining agent-based travel demand models with queue based-traffic flow models, *Procedia Computer Science*, 130, pp. 858-864, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.081
- [10] Renna, A., Petrelli, M., Carrese, S., Bertocci, R.: An Innovative Simulation Agent-Based Model for the Combined Sea-Road Transport as a DSS, *Sustainability*, 13, pp. 1 - 17, doi: 10.3390/su131910773
- [11] Epstein, J. M.: *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*, Princeton University Press, 2007
- [12] SIMTWIST Project, WP 5 – Agent-Based Modelling, <https://www.simtwist.eu/wp-5-agent-based-modelling/>, 26.09.2023.
- [13] Lončar, G., Kulić, T., Kraus, R., Carević, D., Pećarević, M.: Analiza pronosa ličinki iz balastnih voda u akvatoriju luke Ploče, *Hrvatske vode*, 29(115), pp. 11 - 22, 2021
- [14] Kulić, T., Lončar, G., Kovačević, M., Fliszar, R.: Izbor oblika riblje staze s vertikalnim otvorima na temelju primjene ABM modela, *Građevinar*, 73(3), pp. 235 - 247, 2021, doi: 10.14256/JCE.3150.2021
- [15] Scheffer, M., Baveco, J.M., DeAngelis, D.L., Rose, K.A., van Ne, E.H.: Super-individuals a simple solution for modelling large populations on an individual basis, *Ecological Modelling*, 80(2-3), pp. 161-170, 1995, doi: 10.1016/0304-3800(94)00055-M



- [16] Hansen, F.T., Potthoff, M., Uhrenholdt, T., Vo, H.D., Linden, O., Andersen, J.H.: Development of a prototype tool for ballast water risk management using a combination of hydrodynamic models and agent-based modeling, *WMU J. Marit. Affairs*, 14, pp. 219-245, 2015
- [17] Pastor, A., Larsen, J., Thorbjørn Hansen, F., Simon, A., Bierne, N., Maar, N.: Agent-based modeling and genetics reveal the Limfjorden, Denmark, as a well-connected system for mussel larvae, *Marine Ecology Progress Series*, Inter Research, 2021, doi: 10.3354/meps13559
- [18] Dye, B., Jose, F., Richard, J., Brandi Mortensen, J., Milbrandt, E.C.: An agent-based model accurately predicts larval dispersal and identifies restoration and monitoring priorities for eastern oyster (*Crassostrea virginica*) in a Southwest Florida estuary, *Restoration Ecology*, 30(1), pp. 1 - 14, 2022, doi:10.1111/rec.13487
- [19] Wang, C., Feng, T., Wang, P., Hou, J., Qian, J.: Understanding the transport feature of bloom-forming *Microcystis* in a large shallow lake: A new combined hydrodynamic and spatiallyexplicit agent-based modelling approach, *Ecological Modelling*, 343, pp. 25 - 38, 2017
- [20] Kamykowski, D., Reed, R. E., Kirkpatrick, G.J.: Comparison of sinking velocity, swimming velocity, rotation and path characteristics among six marine dinoflagellate species, *Marine Biology*, 113, pp. 319-328, 1992, doi: 10.1007/BF00347287
- [21] Scotti, A.; Pineda, J.: Plankton accumulation and transport in propagating nonlinear internal fronts, *Journal of Marine Research*, 65, 117 – 145, 2007, doi: 10.1357/002224007780388702
- [22] Jiang, H., Kiorboe, T.: The fluid dynamics of swimming by jumping in copepods, *J. R. Soc. Interface*, 8, pp. 1090-1103, 2011, doi: <https://doi.org/10.1098%2Frsif.2010.0481>
- [23] Di Bacco, C., Sutton, D., McConnico, L.: Vertical migration behavior and horizontal distribution of brachyuran larvae in a low-inflow estuary Implications for bay-ocean exchange. *Marine Ecology Progress Series*, 217, pp. 191 – 206, 2001, doi: 10.3354/meps217191
- [24] Razvoj sustava kontrole i obrane luka od unosa stranih vrsta (ProtectAS), <https://protectas.com.hr/>, 27.06.2023.
- [25] Bernardini, G., Camilli, S., Quagliarini, E., D’Orazio, M.: Flooding risk in existing urban environment: from human behavioral patterns to a microscopic simulation model, *Energy Procedia*, 134, pp. 131–140, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.549
- [26] Kim, J., Takabatake, T., Nistor, I., Shibayama, T.: Towards Informed Tsunami Evacuation Management – A Direct Comparison between Agent-Based and GIS-Based Evacuation Models, *Proceedings of the 39<sup>th</sup> IAHR World Congress*, Granada, pp. 6386-6393, 2022, doi: 10.3850/IAHR-39WC2521716X2022544
- [27] Yang, L.E., Scheffran, J., Susser, D., Dawson, R., Chen, Y.D.: Assessment of Flood Losses with Household Responses: Agent-Based Simulation in an Urban Catchment Area, *Environmental Modeling and Assessment*, 23, pp. 369 - 388, 2018, doi: 10.1007/s10666-018-9597-3



## SCAN-TO-4D BIM U PLANIRANJU I IZVEDBI GRAĐEVINSKIH PROJEKATA

Hana Begić<sup>1</sup>

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

### Sažetak

Građevinarstvo doživljava značajan napredak u digitalizaciji usvajanjem tehnologije informacijskog modeliranja građevina (engl. Building Information Modeling - BIM). BIM pruža digitalni prikaz građevina, olakšava suradnju, donošenje odluka i poboljšava rezultate projekta. Unutar BIM-a razvijaju se nove dimenzije među kojima je i 3D modeliranje i 4D vremensko planiranje. Koncept "Scan to BIM" koristi se za prijenos podataka laserskog skeniranja u digitalne BIM modele, što omogućava dokumentiranje početnog stanja, praćenje promjena tijekom vremena i izradu dokumentacije izvedenog stanja dok integracija vremenske dimenzije u BIM modele, poznata kao 4D BIM, omogućuje vizualizaciju i analizu procesa izgradnje tijekom vremena, poboljšavajući upravljanje projektima. Ove tehnologije omogućuju građevinskoj industriji preciznije planiranje i praćenje, smanjujući greške i povećavajući učinkovitost izgradnje.

*Ključne riječi: BIM, Scan-to-BIM, 4D BIM*

## SCAN-TO-4D BIM IN THE PLANNING AND EXECUTION OF CONSTRUCTION PROJECTS

### Abstract

The construction industry is experiencing significant progress in digitization through the adoption of Building Information Modeling (BIM) technology. BIM provides a digital representation of buildings, facilitates collaboration and decision-making, and improves project results. New tools are being developed within BIM, including 3D modeling and 4D time planning. The "Scan to BIM" concept is used to transfer laser scanning data into digital BIM models, which enables documenting the initial state, monitoring changes over time, and creating documentation of the derived state, while the integration of the time dimension into BIM models, known as 4D BIM, enables visualization and analysis of the construction process over time, improving project management. These technologies enable the construction industry to plan more accurately, monitor, reduce errors, and increase construction efficiency.

*Keywords: BIM, Scan-to-BIM, 4D BIM*

## 1. Uvod

Građevinarstvo duži niz godina pokazuje značajni napredak, posebice u domeni digitalizacije, usvajanjem tehnologije informacijskog modeliranja građevina (engl. Building Information Modeling - BIM). Tema BIM-a trenutno predstavlja središnju i, vjerojatno, najvažniju temu za unapređenje građevinarstva, a ujedno i temeljnu tehnologiju za podupiranje ideje četvrte industrijske revolucije u građevinskoj industriji [1]. BIM pruža digitalni prikaz fizičkih i funkcionalnih karakteristika građevine čime olakšava suradnju, poboljšava donošenje odluka i pospešuje rezultate projekta. Unatoč tome što se građevinarstvu često pripisuju karakteristike tradicionalizma te usporenosti u usvajanju novih promjena, smatra se da je građevinska industrija kontinuirano u fazi napretka te se razvijaju i različiti podskupovi BIM-a koji se mogu nazvati dimenzijama, gdje je 3D model građevine, 4D je vrijeme, 5D su troškovi, 6D je rad, 7D je održivost dok je 8D sigurnost [2]. Osim toga, oko BIM-a se razvijaju i razni koncepti njegove primjene kao što je „Scan to BIM“ odnosno proces prijenosa podataka laserskog skeniranja u BIM modele [3]. Važna značajka BIM-a je dvosmjerna koordinacija između fizičkih i virtualnih domena što dovodi do digitalne kopije građevine koja poboljšava kontrolu i optimizaciju procesa izgradnje, a istovremeno generira vrijedne podatke za održavanje građevine, kao i za fazu projektiranja i planiranja buduće izgradnje. Spomenuta virtualna replika građevine može se usporediti sa sličnim konceptom koji se naziva digitalni bliznac građevine [4]. Unatoč mnogim prednostima koje BIM donosi, tradicionalnim 3D BIM modelima često nedostaje važan aspekt: informacije o vremenu i planiranju. Uz sve veću složenost građevinskih projekata, njihovo planiranje i praćenje postali su ključni kako bi se osiguralo učinkovito upravljanje projektima i postizanje očekivanih performansi. Zadaća planiranja izvođenja nije samo izrada plana kao dokumenta koji sadrži popis svih aktivnosti projekta i predviđenih resursa za njihovu realizaciju, već i pronalazak mogućih varijanti izvedbe te stvaranje osnove za odlučivanje o najboljem načinu izvođenja [5]. U tom kontekstu, integracija aspekta vremena u BIM modele uključuje integraciju informacija o planu i redoslijedu u 3D digitalnom prikazu građevinskog projekta. Dodavanjem vremenske dimenzije prostornim podacima moguće je vizualizirati i analizirati proces izgradnje tijekom vremena što dovodi do poboljšanog upravljanja projektom i donošenja odluka. Shodno tome dodavanje vremenske dimenzije poboljšava ne samo aspekt planiranja projekta, nego i aspekt praćenja odnosno monitoringa izgradnje građevine gdje planiranje podrazumijeva izradu početnog plana, dok praćenje osigurava da projekt ostane u skladu s planom ili bilježi odstupanja od plana i nedostatke [6].

## 2. Scan-to-BIM

Tradicionalna praksa praćenja napretka izgradnje ovisi o vizualnim pregledima gdje se mjerenja izvode ručno te dnevnim ili tjednim izvješćima koja se izrađuju na temelju tih pregleda. S obzirom na to da je nužno osigurati da radovi zadovoljavaju specifikacije ugovora i vremenskoga plana, često se koriste zapisnici za izvješćivanje problema i nedostataka o kojima se raspravlja na naknadnim tjednim sastancima [7]. Takva vizualna opažanja i ručno mjerenje su najdominantniji pristupi prikupljanja podataka u stanju izgrađenosti, ali oduzimaju puno vremena, podložni su greškama te je vrlo teško njima postići brzo i pouzdano donošenje odluka [8]. Odgovor na nedostatke tradicionalnih metoda su novije metode prikupljanja podataka kao

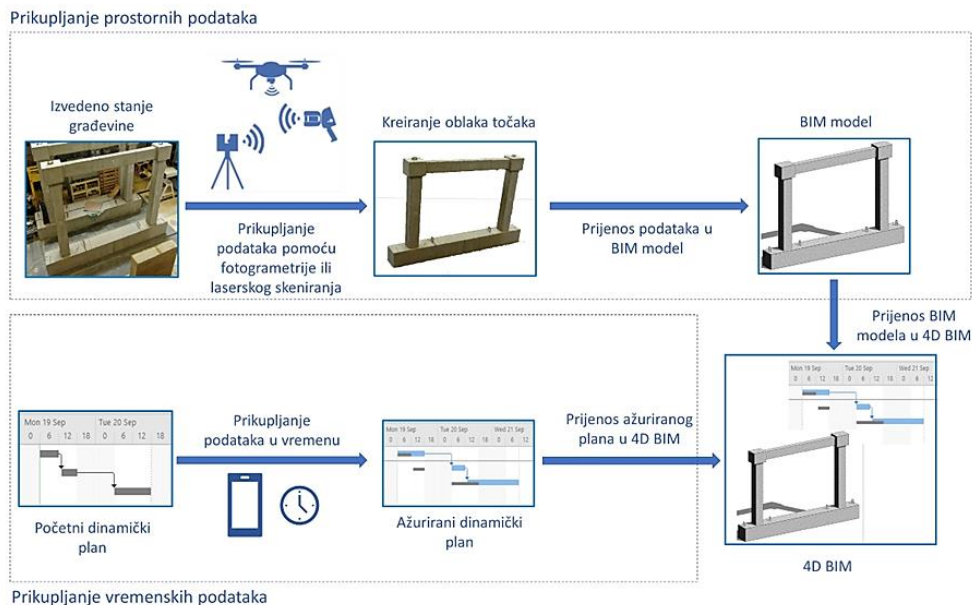
što su integracija fotogrametrije i laserskog skeniranja u rad BIM-a, a integracija tih tehnologija naziva se Scan-to-BIM. Predstavlja značajnu prednost u građevinarstvu jer omogućava dokumentiranje početnog stanja građevine, vođenje ažurirane evidencije praćenja gradilišta, otkrivanje mogućih nedostataka u konstrukciji, procjenu promjena tijekom vremena i izradu dokumentacije izvedenog stanja [9]. Navedeni proces uključuje korištenje tehnologija fotogrametrije ili laserskog skeniranja za snimanje fizičkih karakteristika građevine i pretvaranje tih podataka u digitalni BIM model. Iz konteksta planiranja i praćenja Scan-to-BIM pruža točan prikaz postojećeg stanja na gradilištu. Uspoređujući podatke skeniranja s modelom i početnim planom, voditelji projekta mogu potvrditi status izvedenog projekta. Sva odstupanja ili promjene od plana mogu se rano identificirati omogućujući pravovremene prilagodbe i izbjegavajući potencijalna kašnjenja. Ova se tehnika najčešće koristi za potrebe utvrđivanja odstupanja, preklapanja ili „sudara“ različitih građevinskih elemenata (npr. konstrukcijskih komponenti, mehaničkih sustava, električnih sustava) između inicijalnog modela i izvedene građevine ili dijelova građevine [10].

### 3. 4D BIM

U posljednjem desetljeću porasla je zastupljenost korištenja 4D modeliranja za provođenje analize prije izgradnje te za praćenje aktivnosti na gradilištu tijekom izgradnje. Upotreba 4D modeliranja u kombinaciji s metodama kontrole na gradilištu za praćenje stvarnog napretka i analizu učinaka kašnjenja na cjelokupan dinamički plan dovela je do viših razina performansi izgradnje. Istraživanja u područjima upotrebe 4D BIM-a za planiranje te kontrolu napretka pokazala su da može povećati razinu sigurnosti pri radu i smanjenje otpada te istovremeno smanjiti mogućnost kašnjenja projekta i porasta troškova [11]. Za održavanje kvalitetnog rada projektnog tima potrebno je da projekti tijekom planiranja i izvedbe budu što pouzdaniji kroz točna i ažurirana trajanja, logičan slijed, identifikaciju visokorizičnih aktivnosti i jednostavno praćenje stvarnog napretka u odnosu na planirani napredak, a sve kako bi se osigurala bolja kvaliteta projekta. U ovom kontekstu važno je razumijevanje prednosti uvođenja vremenske dimenzije u 3D modeliranje, odnosno stvaranje 4D BIM-a koji omogućava pravovremeno identificiranje rizičnih aktivnosti te direktno utječe na performanse projekta i sudionika projektnog tima [12]. Osim navedenih prednosti, upotreba 4D BIM-a omogućava i kreiranje simulacije izgradnje. 4D simulacija sastoji se od povezivanja aktivnosti izgradnje s 3D elementima iz modela. Može se provesti u različitim fazama projekta kako bi se analizirao dizajn i izgrađenost te za potrebe praćenja napretka, odnosno u trenutku korištenja početnog dinamičkog plana te kasnije ažuriranog plana [13].

## 4. Scan-to-4D BIM

U ovome radu predlaže se metodologija izrade 4D BIM modela u kontekstu provođenja tehnike Scan-to-4D BIM (Slika 1.)



**Slika 1.** Proces stvaranja 4D BIM modela tehnikom Scan-to-4D BIM

Proces započinje prikupljanjem prostornih podataka o stvarnom izvedenom stanju građevine ili njezinog dijela, odnosno ovaj se proces ne mora provoditi na završetku projekta pri finalno izvedenoj građevini, nego se može provoditi i kontinuirano za praćenje stanja izvođenja. Podaci se mogu prikupljati tehnikom fotogrametrije ili laserskog skeniranja. Pri prikupljanju podataka fotogrametrijom fotografije se najčešće prikupljaju dronom te pomoću prikladnih računalnih programa pretvaraju se u oblak točaka. Prikupljanje podataka laserskim skenerima zahtijeva znatno veća ulaganja u uređaj te se snimljen oblak točaka obrađuje, odnosno pročišćava pomoću prikladnih računalnih programa. Nakon što je oblak točaka obrađen i uređen, podaci se mogu prenijeti u računalni program za 3D modeliranje gdje se stvara 3D model, odnosno BIM model izvedenog stanja. Paralelno s procesom prikupljanja prostornih podataka odvija se prikupljanje vremenskih podataka. Prvobitno je potreban početni dinamički plan izvedbe nakon kojega slijedi prikupljanje podataka u vremenu mobitelom, tabletom i kamerama te se bilježe stvarni počeci i završeci izvedbe elemenata. Prikupljanjem podataka o stvarnim trajanjima aktivnosti ažurira se dinamički plan te postoji mogućnost povezivanja ažuriranog dinamičkog plana s 3D modelom izvedenog stanja na temelju čije povezanosti nastaje 4D BIM. Pomoću 4D BIM-a izvedenog stanja može se provesti i simulacija na temelju koje se može postići lakše razumijevanje napretka, uočavanje grešaka, kašnjenje te postizanje pravovremene komunikacije među sudionicima. Nadalje, primjenom predloženog pristupa i u početnim fazama

projekta može se postići poboljšana vizualizacija, otkrivanje sukoba odnosno sudara elemenata, planiranje resursa i optimizacija plana.

## 5. Zaključak

Digitalizacija građevinarstva značajno je napredovala pomoću BIM-a koji je postao središnja tema i ključna tehnologija za implementaciju četvrte industrijske revolucije u građevinarstvu. BIM pruža digitalni prikaz fizičkih i funkcionalnih karakteristika građevine olakšavajući suradnju, poboljšavajući donošenje odluka i unapređujući rezultate projekta. S vremenom su se razvile i brojne dimenzije BIM-a među kojima su 3D modeliranje i 4D vremensko planiranje. Tijekom posljednjih godina intenzivno se povećava učestalost korištenja 4D modeliranja za provođenje analiza pri planiranju i za praćenje aktivnosti na gradilištu tijekom izgradnje, a osim toga omogućuje i prikaz simulacije izgradnje, kako prema početnom planu, tako i prema ažuriranom. Pridodavanjem vremenskih informacija prostornim podacima, moguće je vizualizirati i analizirati proces izgradnje tijekom vremena što dovodi do poboljšanog upravljanja projektima i donošenja odluka čime se pospješuje praćenje izgradnje osiguravajući da izvedba ostane u skladu s planom. Takve metode odgovor su na nedostatke tradicionalnih metoda te se danas često koristi integracija fotogrametrije i laserskog skeniranja u rad BIM-a pod nazivom Scan-to-BIM. Pri korištenju fotogrametrije podaci se, najčešće, prikupljaju dronom te pomoću prikladnih računalnih programa pretvaraju u oblak točaka, dok prikupljanje podataka laserskim skenerima zahtijeva znatno veća ulaganja. Osim što se prikupljaju prostorni podaci, odvija se i prikupljanje vremenskih podataka pri čemu je potreban početni dinamički plan građenja. Prikupljanjem podataka o stvarnim trajanjima aktivnosti ažurira se dinamički plan, a integracija ažuriranog dinamičkog plana s modelom izvedenog stanja čini 4D BIM. Integracija BIM-a, Scan-to-BIM i 4D BIM-a omogućuje preciznije planiranje, praćenje i upravljanje projektima u građevinarstvu čime se smanjuju greške, povećava učinkovitost izgradnje te poboljšava kvaliteta projekta.

## Literatura

- [1] Oesterreich, T.D., Teuteberg F.: Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry, *Computers in industry*, 83, pp. 121 - 139, 2016, doi: 10.1016/j.compind.2016.09.006
- [2] Smith, P.: BIM & the 5D project cost manager, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 119, pp. 475- 484, 2014, doi: 10.1016/j.sbspro.2014.03.053
- [3] Wang, Q., Guo, J., Kim, M.-K.: An application oriented scan-to-BIM framework, *Remote sensing*, 11(3), pp. 365, 2019, doi: 10.3390/rs11030365
- [4] Maskuriy, R., Selamat, A., Ali, K.N., Maresova, P., Krejcar, O.: Industry 4.0 for the construction industry—how ready is the industry?, *Applied Sciences*, 9(14), pp. 2819, 2019, doi: 10.3390/app9142819
- [5] Radujković, M., Burcar Dunović, I., Dolaček-Alduk, Z., Nahod, M., Vukomanović, M.: Organizacija građenja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015
- [6] Ratajczak, J., Schimanski, C.P., Marcher, C., Riedl, M., Matt, D.T.: Mobile application for collaborative scheduling and monitoring of construction works according to lean construction methods, *Mobile application for collaborative scheduling and monitoring of*

- construction works according to lean construction methods, Springer, pp. 207 - 214, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-66805-5\_26
- [7] Bosché, F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C.T., Haas, R.: The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components, *Automation in Construction*, 49, pp. 201-213, 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2014.05.014
- [8] Son, H., Kim, C., Turkan, Y.: Scan-to-BIM-an overview of the current state of the art and a look ahead, *Scan-to-BIM-an overview of the current state of the art and a look ahead*, Citeseer, pp. 1, 2015, doi: 10.22260/ISARC2015/0050
- [9] Rocha, G., Mateus, L., Fernández, J., Ferreira, V.: A scan-to-BIM methodology applied to heritage buildings, *Heritage*, 3(1), pp. 47 - 67, 2020, doi: 10.3390/heritage3010004
- [10] Suprun, E., Mostafa, S., Stewart, R.A., Villamor, H., Sturm, K., Mijares, A.: Digitisation of Existing Water Facilities: A Framework for Realising the Value of Scan-to-BIM, *Sustainability*, 14(10), pp. 6142, 2022, doi: 10.3390/su14106142
- [11] Jupp, J.: 4D BIM for environmental planning and management, *Procedia engineering*, 180, pp. 190-201, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.178
- [12] Crowther, J., Ajayi, S.O.: Impacts of 4D BIM on construction project performance, *International Journal of Construction Management*, 21(7), pp. 724 - 737, 2021, doi: 10.1080/15623599.2019.1580832
- [13] Boton, C., Kubicki, S., Halin, G.: The challenge of level of development in 4D/BIM simulation across AEC project lifecycle. A case study, *Procedia Engineering*, 123, pp. 59 - 67, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.10.058

## UMIJEĆE RATOVANJA U UPRAVLJANJU GRAĐEVINSKIM PROJEKTIMA

Dino Obradović<sup>1,2</sup>

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

(2) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Ekonomski fakultet u Osijeku, Republika  
Hrvatska

### Sažetak

Knjiga Umijeće ratovanja autora Sun Tzua primarno je pisana kao vojni priručnik, daje upute i savjete za vođenje rata te govori o taktikama. Međutim, sve dane upute mogu se čitati i tumačiti na više razina te mogu pomoći u različitim područjima ljudskog života i rada poput upravljanja projektima, menadžerima u upravljanju, vođenju, kontroliranju i planiranju te općenito na osobnoj ili poslovnoj razini. Problematika upravljanja projektima bilo koje vrste, pa tako i građevinskim projektima, može se promatrati u svjetlu onoga što je napisano u spomenutoj knjizi. Upravljanje projektima je primjena metoda, vještina, alata i znanja za postizanje specifičnih ciljeva projekta prema kriterijima prihvatljivosti projekta unutar dogovorenih zahtjeva. U radu će se kratko prikazati poglavlja knjige te primjenjivost istih u području upravljanja građevinskim projektima.

*Ključne riječi: građevinski projekti, menadžer, strategije, Sun Tzu, Umijeće ratovanja, upravljanje*

## THE ART OF WAR IN CONSTRUCTION PROJECT MANAGEMENT

### Abstract

The book *The Art of War* by Sun Tzu was primarily written as a military manual and gives instructions and advice on conducting a war and on war tactics. However, all the given instructions can be read and interpreted on multiple levels and can help in different areas of human life and work. Many of these tips can be applied at both the personal and business levels, such as in project management or for improving managerial skills in managing, leading, controlling and planning. The issue of project management of any kind, including construction projects, can be viewed in the light of what is written in *The Art of War*. Project management is the application of methods, skills, tools and knowledge to achieve specific project goals according to project acceptance criteria within agreed requirements. The paper will briefly present the chapters of the book and their applicability in the field of construction project management.

*Keywords: construction projects, managers, strategies, Sun Tzu, The Art of War, management*



## 1. Uvod

Rat ne mora nužno značiti samo oružani sukob. U modernom svijetu riječ rat koristi se za prikazivanje niza prisilnih situacija koje su po svojoj prirodi vojne i nevojne, nasilne i nenasilne. Posao može biti rat, kao i neki projekt. Svaki posao suočava se s pobjedama i porazima, napadima i povlačenjima. Ima svoje sporazume i saveze, koristi špijune te poduzima obmanjujuće manevre. Projekti se, pak, bore za ograničena sredstva, a glavni cilj mu je uspjeh. Glavna strategija rata definiranje je željenog ishoda i specifičnog cilja. Taktika se bavi tekućim zadacima i problemima. Šanse za pobjedu su velike. Ako je zapovjednik napravio točne preliminarnе proračune, tada on pobjeđuje i prije početka bitke [1].

Ako se osvrnemo na voditelja građevinskog tima kao nadređenog, jasna je potreba da on + neprekidno usavršava svoje menadžerske vještine. Unatoč drugačijem okruženju, dolazimo do zaključka da su neki od relevantnijih menadžerskih koncepata koje koristi projektni menadžer u upravljanju građevinskim projektima slični onima u upravljanju ratovanjem. Iz navedenog proizlazi da uporaba strategija vođenja rata za donošenje odluka nije novost u poslovnom svijetu [2].

## 2. Umijeće ratovanja: o knjizi

Djelo *Umijeće ratovanja* napisano je prije oko 2500 godina u drevnoj Kini [3, 4, 5], a priznato je kao jedno od najstarijih i najdubljih kineskih klasika o vojnim raspravama i ratovanju [3]. U Aziji je izučavaju moderni političari i menadžeri tvrtki, kao što su je tijekom protekla dva tisućljeća proučavali vojskovođe i stratezi. Knjigu je napisao kineski ratnik-filozof Sun Tzu [6]. U pisanju ovog rada korištene su autoru dostupne inačice prijevoda knjige koje su prikazane na slici 1.



Slika 1. Naslovne stranice konzultiranih knjiga [D. Obradović]

Knjiga se nalazi na popisu preporučene literature za američke marince [4], a o akademskoj vrijednosti knjige govori činjenica da je bila predmet doktorske disertacije obranjene na Sveučilištu Oxford u listopadu 1960. godine [7]. Sun Tzuove strategije imaju međukulturnu i međuvremensku primjenjivost [8].

Knjiga se sastoji od 13 poglavlja, a nazivi svakog te glavna misao dane su u tablici 1.

**Tablica 1.** Sažetak poglavlja knjige Umijeće ratovanja

Poglavlje	Naziv poglavlja [5]	Prijevod poglavlja na engleski jezik [9, 10]	Glavna razmatranja [4, 6, 9, 11]
1.	Procjena strategije	Planning, Calculations	Pravilno planiranje strategije
2.	Vođenje bitke	Preparations, Challenges	Izbjegavanje dugotrajne kampanje
3.	Planiranje opsade	Strategy, Plan of attack	Pobjeda neprijatelja bez borbe
4.	Formacija	Tactics, Positioning	Pronalaženje ranjivosti neprijatelja
5.	Sila	Organisation, Directing	Organizacijske vještine, koordinacija
6.	Praznina i punina	Seizing opportunities, Illusion and reality	Čuvanje energije, nepredvidljivost strategije
7.	Oružana borba	Manoeuvres, Engaging the force	Obavljanje procjena, biti spreman
8.	Prilagodba	Variation in tactics, The nine variations	Mogućnost prilagodbe
9.	Manevriranje vojskama	Sites and observations, Moving the force	Istraživanja situacije neprijatelja
10.	Teren	Terrain, Situational positioning	Ratnikova umijeća: fizičko, društveno i psihičko; taktičko manevriranje
11.	Devet vrsta tla	Positions, The nine situations	Stimulacija podređenih
12.	Napad vatrom	Fire, The fiery attack	Opreznost u obavljanju zadataka
13.	O korištenju špijuna	Spies, The use of intelligence	Upotreba ljudske inteligencije

### 3. Primjena Umijeća ratovanja na upravljanje građevinskim projektima

#### 3.1. Građevinski projekt i upravljanje

Građevinarstvo je izrazito projektno usmjerena djelatnost čije se poslovanje odvija upravno na osnovi projekata [12]. Oni su prisutni u svim područjima ljudske djelatnosti [13]. Građevinski projekt podrazumijeva sve aktivnosti koncipiranja, definiranja i izvršenja pothvata u svrhu izgradnje i predaje na korištenje građevine koja zadovoljava potrebe naručitelja [12]. Upravljanje projektima je primjena znanja, vještina alata i tehnika na projektne aktivnosti kako bi se zadovoljili projektni ciljevi [14]. Upravljanje projektom je podsustav projekta koji osigurava da se točno definirani ulaz zadanim procesima pretvori u točno zadani izlaz koji je predmet isporuke naručitelju u unaprijed zadanim uvjetima [12].

#### 3.2. Principi upravljanja građevinskim projektima

Kako je već rečeno, principe navedene u *Umijeću ratovanja* moguće je primijeniti na upravljanje građevinskim projektima.

Na temelju sadržaja svakog poglavlja i tumačenja rečenica kada bi se poglavlja primijenila u upravljanju projektima, vrijedili bi sljedeći nazivi poglavlja:

- Koncept projekta
- Strategija
- Taktika
- Procjena resursa
- Odabir strategije
- Slabosti i prednosti
- Realizacija projekta
- Fleksibilnost
- Upravljanje resursima
- Projektno okruženje
- Upravljanje rizicima
- Jedinstvene aktivnosti
- Prikupljanje informacija [15].

Prateći *Umijeće ratovanja*, može se primijetiti koliko je važno jasno razlikovati fazu planiranja i fazu provedbe u svakom projektu [15].

Prvo poglavlje govori o tome kako je potrebno sve odmjeriti uz pomoć pet elemenata: put, vremenski uvjeti, teren, zapovjedništvo i disciplina. Pod vremenom se misli na godišnja doba [6]. Disciplina podrazumijeva organizaciju, zapovjedni lanac i logistiku [6]. To je način na koji je rad organiziran, tj. kako se njime upravlja [16].

Kako se u knjizi navodi „biti pripravan za sve okolnosti jamstvo je sigurne pobjede“. Spomenuti citat naglašava da u upravljanju projektima mora se biti spreman na sve okolnosti, pripremiti potrebne resurse, uzeti u obzir sve čimbenike bez obzira na vjerojatnost i mogućnost pojavljivanja: „Prva je namjera, zatim izmjera, zatim izračuni, zatim uravnoteženje“ [4]. Sve navedeno može se prihvatiti i u građevinarstvu. Nužno je specificirati što se želi postići projektom, točno definirati zadatke, izračunati potrebne resurse te nivelirati resurse [17].

Nadalje, ako promotrimo rečenicu „U uskipjelu metežu bitke možda će vam se vaše snage učiniti kaotičnima, no njihov se red zapravo ne može remetiti; u graji i pomutnji vaš raspored može se činiti bezličnim no zapravo je i dalje nepobjediv“ [4] dolazimo do sljedećeg. Kada se pogleda gradilište, može se činiti da tu nema organizacije, da se ne zna tko što radi, da se resursi (materijali, strojevi, radnici) kreću i obavljaju zadatke bez nekog određenog reda i organizacije. Neuvježbana i nestručna osoba ne uočava principe organizacije gradilišta, no upravo suprotno. Na gradilištu mora biti visok stupanj planiranja, organiziranja i kontrole svega što se radi. Voditelj projekta mora u svakom trenutku iznova i iznova procjenjivati situaciju jer je svako gradilište posebno i novo, nema ponavljajućih radnji, javljaju se nove situacije i izazovi. Stoga, Sun Tzu navodi: „Brižno odmjeri situaciju prije nego što povučeš potez“ [11].

Umijeće ratovanja sadrži mnoge opise atributa idealnog vođe. U opisivanju idealnog generala/voditelja uobičajeni pojmovi koje koristi su humanost (dobrohotnost i pravednost) i prosvijetljenost [18]. U opisivanju ideala općenito Sun Tzu navodi pet atributa: inteligencija, pouzdanost, čovječnost, hrabrost i strogost [6]. Voditelji projekta i projektni tim u izgradnji odgovorni su za ukupni uspjeh ispunjenja investitorovih zahtjeva unutar ograničenja u smislu troškova, rasporeda, kvalitete i sigurnosnih zahtjeva [19]. Stoga, onaj koji vodi projekt mora imati osobine koje Sun Tzu navodi.

„... General se mora i dalje upoznati s terenom ... prije nego što uzmogne vojsku provesti kroza nj.“ [4]. Voditelj projekta ako nije dobro upoznat s onim što se radi, što se gradi i u kojim okolnostima, ne može dobro voditi projekt i upravljati istim.

Primarna dužnost generala je dobiti bitku po najnižoj cijeni za njegovu zemlju i pomoći svom vladaru da zaštiti interese svoje zemlje i naroda te ih, po potrebi, proširi i izvan nje. Voditelj projekta kojeg imenuje ili klijent, ili glavni izvođač, odgovoran je za cjelokupnu provedbu projekta, odnosno planiranje, organizaciju, kontrolu i koordinaciju cjelokupnog projekta od početne faze projekta do njegove realizacije [2].

#### 4. Zaključak

Unatoč tome što je Umijeće ratovanja autora Sun Tzua napisano prije više od 2500 godina, svih 13 poglavlja može se lako primijeniti i danas u svim područjima života, pa tako i u upravljanju građevinskim projektima. General i voditelj projekta/menadžer dijele brojne sličnosti u svojim dužnostima, iako u dva potpuno različita okruženja. Kvalitete voditelja projekta od velike su važnosti u upravljanju građevinskim projektima, kao što je neosporno važno vođenje generala u ratu. Uspješan završetak projekta ovisi o njegovom utjecaju na ljude da se obvežu na postizanje ciljeva projekta koji im on postavlja. Upravljanje građevinskim projektima može biti učinkovitije ako voditelj projekta kontinuirano usavršava svoje menadžerske vještine i sposobnosti vođenja.

#### Literatura

- [1] Myakenkayaa, G., Chubisova, I., Chubissova, A.: Similarities and differences of the war and projects. *Winning strategies, Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119 pp. 314-320, 2014, doi: 10.1016/j.sbspro.2014.03.036
- [2] Sui Pheng, L. Chuvesiriporn, C.: Ancient Thai battlefield strategic principles: lessons for leadership qualities in construction project management, *International Journal of Project Management*, 15 (3), pp. 133-140, 1997, doi: 10.1016/S0263-7863(96)00062-2

- [3] Sui Pheng, L., Hui Fang, T.: Modern-day lean construction principles: Some questions on their origin and similarities with Sun Tzu's Art of War, *Management Decision*, 43 (4), pp. 523-541, 2005, doi: 10.1108/00251740510593530
- [4] Sun Tzu: Umijeće ratovanja, s kineskog na engleski preveo James Trapp; s engleskoga preveo Petar Vujačić, Planetopija, Zagreb, 2023.
- [5] Teck Foo, C.: The Art of War: system of systems engineering perspectives, *Chinese Management Studies*, 2 (4), pp. 317-326, 2008, doi:10.1108/17506140810910953
- [6] Sun Tzu: Umijeće ratovanja: potpuni tekst s komentarima; na engleski preveo Thomas Cleary; s engleskoga preveo Miro Labus, Petrine knjige, Zagreb, 2022.
- [7] Griffith, S. B.: Sun Tzu: The Art of War, Clarendon Press, Oxford, 1963.
- [8] Yean Yng Ling, F., Yee Lee, S.: Careers development in construction firms: application of Sun Tzu's Art of War principles, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19 (2), pp. 173-191, 2012, doi: 10.1108/09699981211206106
- [9] Sui Pheng, L., Hui Hong, S.: Strategic quality management for the construction industry, *The TQM Magazine*, 17 (1), pp. 35-53, 2005, doi: 10.1108/09544780510573048
- [10] Low, S. P., Tan, M. C. S.: A convergence of western marketing mix concepts and oriental strategic thinking, *Marketing Intelligence & Planning*, 13 (2), pp. 36-46, 1995, doi: 10.1108/02634509510083491
- [11] Sun Tzu: Umijeće ratovanja: novi prijevod izvornog teksta s tumačenjima, uredio, preveo i predgovor napisao John Minford; s engleskoga prevela Mirna Čubranić, Mozaik knjiga, Zagreb, 2009.
- [12] Radujković, M. i suradnici: Organizacija građenja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.
- [13] Radujković, M. i suradnici: Upravljanje i kontrola projekata, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2012.
- [14] Gojšić, J., Horvatinčić, K., Jugo, G., Marjanović, N.: Upravljanje projektima, Incremedia, Zagreb, 2008.
- [15] Spalek, S. J.: The art of war in project management. Paper presented at PMI® Global Congress 2006—EMEA, Madrid, Spain. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2006. <https://www.pmi.org/learning/library/art-war-project-management-principles-8165>, 04.07.2023.
- [16] Krause, G. D.: Umijeće ratovanja za menadžere: pradávná mudrost Sun Tzuovog teksta - protumačena za današnjeg poslovnog čitatelja, s engleskoga prevela Dunja Vražić-Stejskal, Binoza press, Zagreb, 2003.
- [17] ICES, Upravljanje projektima, temeljni principi, <http://www.efos.unios.hr/upravljanje-operacijama-poduzeca/wp-content/uploads/sites/151/2017/11/7.-Upravljanje-projektima-2017.pdf>, 15.06.2023.
- [18] Dimovski, V., Marič, M., Uhan, M., Đurica, N., Ferjan, M.: Sun Tzu's "The Art of War" and Implications for Leadership: Theoretical Discussion, *Organizacija*, 45 (4), pp.151-158, 2012, doi: 10.2478/v10051-012-0017-1
- [19] Edum-Fotwe, F. T., McCaffer, R.: Developing project management competency: perspectives from the construction industry, *International Journal of Project Management*, 18 (2), pp. 111-24, 2000, doi: 10.1016/S0263-7863(98)90075-8

## UTJECAJ TRETMANA GUMENOG AGREGATA NA MEHANIČKA SVOJSTVA CEMENTOM STABILIZIRANOG NOSIVOG SLOJA S OTPADNOM GUMOM

Matija Zvonarić<sup>1</sup>

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

### Sažetak

Ugradnja otpadne gume u cementom stabilizirane nosive slojeve kolnika pokazuje nedostatke kao što je smanjenje čvrstoće mješavine. Kako bi se ti nedostaci nadomjestili, guma se može tretirati različitim sredstvima i na različite načine. Ovo istraživanje obuhvaća tretiranje gume natrijevim hidroksidom i kipućom vodom. Guma tretirana na ovaj način ugrađena je u mješavinu definiranu u sklopu projekta „RubSuPave“ koja nije zadovoljila uvjete tlačne čvrstoće za ugradnju u nosive slojeve kolnika. Rezultati pokazuju kako oba tretmana gume uzrokuju smanjenje tlačne čvrstoće mješavine. Pri tome je smanjenje nakon 7 dana podjednako, dok su bolji rezultati postignuti nakon 28 dana tretmanom natrijevim hidroksidom. Uz to, nakon 28 dana njege postignuta je veća krutost stabilizacijske mješavine s gumom tretiranom natrijevim hidroksidom. Dodatno je analizirana i površina gume pretražnim elektronskim mikroskopom čime je utvrđeno kako su oba tretmana uzrokovala znatnu nepravilnost površine gume. Primijenjenim metodama nije postignuto povećanje čvrstoće mješavine.

*Ključne riječi: stabilizacijska mješavina, otpadna guma, čvrstoća, krutost, RubSuPave*

## IMPACT OF RUBBER AGGREGATE TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT STABILIZED BASE COURSE WITH WASTE RUBBER

### Abstract

The incorporation of waste rubber in cement-stabilized bearing layers exhibits drawbacks, such as a reduction in the mixture's strength. To address these drawbacks, various treatments can be applied to the rubber. This research investigates the treatment of rubber with sodium hydroxide and boiling water. The rubber treated using these methods was incorporated into a mixture defined within the „RubSuPave“ project that did not meet the compressive strength requirements for installation in the pavement's bearing layers. The results indicate that both rubber treatments lead to a decrease in the compressive strength of the mixture. After 7 days, the reduction is similar for both treatments, while better results were achieved after 28 days with the sodium hydroxide treatment. Additionally, after 28 days of curing, the rubber treated with sodium hydroxide exhibited increased stiffness in the stabilization mixture. Furthermore, the rubber surface was analyzed using a scanning electron microscope, revealing significant irregularities caused by both treatments. The applied methods did not result in an increase in the mixture's strength.

*Keywords: stabilized mixture, waste rubber, strength, stiffness, RubSuPave*

## 1. Uvod

Cementom stabilizirani nosivi sloj (CNS) ugrađuje se u kolničke konstrukcije velikog prometnog opterećenja i kao takav izložen je ponavljajućem dinamičkom opterećenju prenesenom preko osovina vozila. Ovaj materijal ima veliku krutost i kao posljedica podložan je nastanku pukotina i njihovom širenju [1]. Kao jedna od mjera smanjenja nastanka takvih pukotina istražuje se upotreba prerađene otpadne gume u stabilizacijskim mješavinama. No, istraživanja pokazuju kako guma ima negativan utjecaj na tlačnu čvrstoću, indirektnu vlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje [2–4]. Primjena otpadne gume u stabilizacijskoj mješavini istražuje se i na *Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek* u okviru projekta „RubSuPave“. Rezultati ovog projekta, također, pokazuju kako guma izaziva smanjenje tlačne čvrstoće mješavina [5–7]. Kvalitetu ovog materijala ponajprije karakterizira njegova tlačna čvrstoća. Osim temeljem tlačne čvrstoće, ponašanje ovog materijala moguće je okarakterizirati i pomoću njegove krutosti. Mjere krutosti materijala su dinamički i statički modul elastičnosti. Zbog jednostavnosti primjene i nerazorne prirode provođenja ispitivanja, najzastupljenija je metoda određivanja dinamičkog modula elastičnosti mjerenjem brzine prolaska ultrazvučnog impulsa [8,9]. Stoga se dinamički modul elastičnosti češće koristi u okviru laboratorijskih ispitivanja. Autori Farhan i suradnici [3] tvrde kako povećanjem udjela gume u mješavini dolazi do smanjenja dinamičkog modula elastičnosti, odnosno upotrebom gume dolazi do smanjenja krutosti mješavine. Kako bi se negativan utjecaj gume smanjio, istraživači primjenjuju različite metode površinskog tretiranja gumenog agregata s ciljem boljeg povezivanja gume s cementnom pastom unutar mješavine. Pri tome, u fokusu su tretmani gume koji ne zahtijevaju znatne modifikacije proizvodnog procesa i znatno povećanje cijene materijala. Takve metode su tretman gumenog agregata otopinom natrijevog hidroksida i tretman gumenog agregata kipućom vodom. Ovi materijali su jeftini, lako dostupni i lako primjenjivi. No, primjena ovih metoda je za sada istražena samo za betone s otpadnom gumom. Primjenom natrijevog hidroksida u tretiranju gume dolazi do reakcije NaOH i cinkovog stearata čime osnažuju veze između gume i cementne paste [10]. Autori Agrawal i suradnici [11] tretirali su gumena vlakna 1 molarnom otopinom natrijevog hidroksida (4 %-tna otopina). Kao rezultat povećana je tlačna čvrstoća betona u odnosu na beton s netretiranim gumenim vlaknima. Nadalje, tretmanom gume otopinom NaOH dolazi do stvaranja valovite površine čestice gume što omogućava bolje obavijanje gume cementnom pastom. Modifikacija gume natrijevim hidroksidom eliminira hidrofobnu prirodu gume što omogućava bolju adheziju između gume i cementne paste [12,13]. U radu [13] autori ističu kako se tretmanom otopinom NaOH ne postiže smanjenje površinskih nepravilnosti koje povećavaju poroznost matrice i smanjuju njena mehanička svojstva. S druge strane, tretiranjem gume visokom temperaturom postiže se smanjenje masenog udjela cinka u gumi koji je uzrok slabih unutarnjih veza između gume i cementne paste. Nadalje, zagrijavanjem gume izgaraju nečistoće te ona stvara svojevrsnu ljušturu čime se smanjuje njena elastičnost [14]. Unutar ovog istraživanja biti će ispitana mogućnost primjene tretmana gume natrijevim hidroksidom sa svrhom smanjenja hidrofobnosti gume i osnaženja unutarnjih veza između gume i cementne paste. Druga metoda koja će biti primijenjena je dodavanje kipuće vode u mješavinu agregata kako bi se postigli učinci metode zagrijavanja gume te spriječilo potencijalno smanjenje elastičnosti čestica gume. Ove metode bit će primijenjene na mješavini

ispitanoj u okviru projekta „RubSuPave“ koja nije zadovoljila zahtjeve za tlačnu čvrstoću propisane Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama [15]. Cilj ovog istraživanja je poboljšati povezanost gume s ostatkom matrice stabilizacijske mješavine metodom koja ne zahtjeva promjene u tehnološkom procesu proizvodnje i ugradnje mješavine. Kao rezultat bolje povezanosti očekuje se veća čvrstoća mješavine.

## **2. Metodologija**

### **2.1. Priprema uzoraka**

Cilindrični uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće i brzine prolaska ultrazvučnog impulsa proizvedeni su pomoću vibrirajućeg čekića postupkom opisanim u normi HRN EN 13286 – 51 [16]. Ispitana je mješavina s 5 % cementa i 30 % volumne zamjene pijeska s gumenim granulatom (C5R30). Detaljan opis mješavine prikazan je u radu [5]. Primijenjena su dva tretmana gume. Jedan tretman obuhvaća potapanje gume u 5 %-tnu otopinu natrijevog hidroksida (C5R30 – NaOH) u trajanju od sat vremena. Nakon toga guma je temeljito isprana na situ pod mlazom vode. Drugi tretman je proveden na način da se zamiješanoj mješavini agregata dodala kipuća voda (C5R30 - 100°C) u količini ekvivalentnoj optimalnoj količini vode definiranoj za mješavinu. Mješavina je zatim zamiješana i ostavljena sat vremena da se ohladi na sobnoj temperaturi prije dodavanja cementa kako se toplom vodom ne bi ubrzao proces hidratacije cementa i stvaranja snažnih unutarnjih naprezanja u ranom razdoblju njege. Uzorci su njegovani 7 i 28 dana.

### **2.2. Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti**

Dinamički modul elastičnosti određen je primjenom nerazorne metode mjerenja brzine ultrazvučnog impulsa. Postupak se provodi prema normi za testiranje betona HRN EN 12504 – 4 [17]. Mjerenje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa mjeri se pri frekvenciji do 54 kHz na način da se prijatelj i predajnik ultrazvučnog impulsa postave okomito na bazu horizontalno položenog cilindričnog uzorka. Kontakt hrapave površine uzorka i uređaja osigurava se gelom. Dinamički modul elastičnosti se potom računa prema izrazu danom u navedenoj normi.

### **2.3. Ispitivanje tlačne čvrstoće**

Ispitivanje tlačne čvrstoće uzorka provedeno je na automatskoj preši prema normi HRN EN 13286 – 41 [18]. Ispitivanje obuhvaća opterećenje uzorka vertikalnom silom s kontinuiranim prirastom. Do loma uzorka treba doći između 30. i 120. sekunde od početka unosa opterećenja pa se sukladno tome, temeljem iskustva, određuje prirast sile tijekom ispitivanja.

### **2.4. Mikroanaliza pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)**

Zbog boljeg razumijevanja mehanizama unutar matrice mješavine, morfologija gumenih čestica prije i nakon dvaju tretmana analizirana je pretražnim elektronskim mikroskopom (eng. scanning electron microscope – SEM). Prije analize pomoću SEM-a uzorak je potrebno u potpunosti osušiti te osigurati dobru obavijenost uzorka elektroprovodljivim materijalom. U ovom slučaju uzorak je obavijen zlatom.



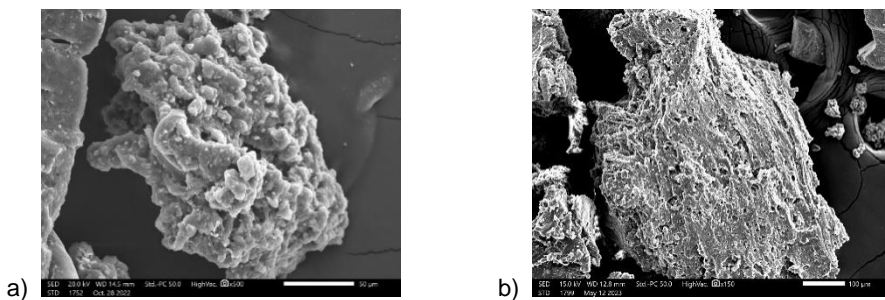
### 3. Rezultati

Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana njege prikazani su tablicom 1.

**Tablica 1.** Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti

Mješavina	Tlačna čvrstoća [MPa]		Dinamički modul elastičnosti [GPa]	
	7 dana	28 dana	7 dana	28 dana
C5R30	1.56	1.94	5.656	8.588
C5R30 - NaOH	1.03	1.74	4.875	8.856
C5R30 - 100°C	1.05	1.33	4.833	6.853

Prikazani rezultati pokazuju kako se nije postiglo očekivano povećanje mehaničkih svojstava materijala tretmanom korištene gume. Kod oba tretmana došlo je do podjednakog pada tlačne čvrstoće uzoraka nakon 7 dana njege i to za 34.11 % i 32.82 %. Dinamički modul elastičnosti nakon 7 dana, također, pokazuje slične rezultate. Pad dinamičkog modula elastičnosti za tretman natrijevim hidroksidom nakon 7 dana iznosi 13.82 %, a za tretman kipućom vodom 14.55 %. Nakon 28 dana njege rezultati su nešto drugačiji. Uočen je znatno manji pad čvrstoće i modula mješavina tretiranih natrijevim hidroksidom u odnosu drugu mješavinu. Kod tretmana natrijevim hidroksidom nakon 28 dana došlo je do pada čvrstoće za 10.53 % i porasta modula za 3.13 %. Tretman kipućom vodom je nakon 28 dana rezultirao padom čvrstoće za 31.32 % i modula za 20.20 %. Temeljem ovih rezultata, tretman kipućom vodom može se odbaciti kao metoda za poboljšanje mehaničkih svojstava mješavine, dok tretman natrijevim hidroksidom pokazuje određeno poboljšanje nakon duljeg vremena njege. Očito je kako je natrijev hidroksid smanjio negativni utjecaj cinka i izazvao stvaranje jačih veza unutar matrice što je vidljivo u većoj krutosti postizanjem većeg modula elastičnosti. No, bez obzira na povećanje krutosti mješavine, došlo je do smanjenja tlačne čvrstoće što nije u skladu s istraživanjima u betonima s tretiranom otpadnom gumom [11]. Naime, u mješavini betona prisutno je znatno više cementne paste koja u potpunosti obavlja zrna agregata, dok to nije slučaj u stabilizacijskoj mješavini. Kako bi se otkrio razlog smanjenja tlačne čvrstoće provedena je analiza pretražnim elektronskim mikroskopom. Na Slici 1. a) prikazana je čestica gume tretirana natrijevim hidroksidom, dok je na Slici 1. b) prikazana guma tretirana kipućom vodom. Guma sa Slike 1. a) ima znatno hrapaviju površinu u odnosu na gumu sa Slike 1. b). Nadalje, guma tretirana kipućom vodom ima ravniju površinu ispunjenu porama do kojih je, vjerojatno, došlo zbog kidanja molekularnih veza uslijed visoke temperature. Analizom površine gume može se zaključiti kako je u oba slučaja gumena čestica zarobila čestice zraka u porama i time stvorila poroznu strukturu matrice i izazvala smanjenje tlačne čvrstoće obje mješavine.



Slika 1. Analiza čestica gume pretražnim elektronskim mikroskopom

## 4. Zaključak

U ovom istraživanju primijenjene su dvije metode površinskog tretmana gumenih čestica s ciljem povećanja čvrstoće mješavine. Obje metode su rezultirale povećanom površinom čestica koja zarobljava molekule zraka i time stvara poroznu matricu mješavine. Takve mješavine razvijaju manje čvrstoće. No, tretiranje gume natrijevim hidroksidom izazvalo je manje smanjenje tlačne čvrstoće nakon duljeg vremena njege i povećanje modula elastičnosti. Ovim tretmanom umanjen je negativni utjecaj cinka na hidrataciju i osigurano je bolje povezivanje gume s cementom pastom što rezultira većom krutosti mješavine.

## Zahvala

Ovo istraživanje financirano je sredstvima Hrvatske zaklade za znanost u okviru projekta UIP – 2019 – 04 – 8195 Cementom stabilizirani nosivi slojevi s otpadnom gumom za održive kolnike – „RubSuPave“.

## Literatura

- [1] Zvonarić, M., Dimter, S.: Prevention and remediation measures for reflective cracks in flexible pavements, *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 74(3), pp. 189–97, 2022, doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.3427.2021>
- [2] 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, pp. 94 - 102, 2016, doi: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.018>
- [3] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H., Adam, S., Smith, M.J.: Flexural characteristics of rubberized cement-stabilized crushed aggregate for pavement structure, *Materials and Design*, 88, pp. 897-905, 2015, doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.071>
- [4] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H.: Compressive behaviour of rubberized cement-stabilized aggregate mixtures, *Construction and Building Materials*, 262(120038), 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120038>
- [5] Zvonarić, M., Barišić, I., Galić, M., Minažek, K.: Influence of Laboratory Compaction Method on Compaction and Strength Characteristics of Unbound and Cement-Bound Mixtures, *Applied Sciences* 11(11), 2021, doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app11114750>

- [6] 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, 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1202/1/012047>
- [7] Barišić, I., Zvonarić, M., Netinger Grubeša, I., Šurdonja, S.: Recycling waste rubber tyres in road construction, Archives of Civil Engineering, 67(1), pp. 499-512, 2021, doi: <https://doi.org/10.24425/ace.2021.136485>
- [8] Barišić, I., Dokšanović, T., Draganić, H.: Characterization of hydraulically bound base materials through digital image correlation, Construction and Building Materials, 83, pp. 299–307, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.033>
- [9] Barišić, I., Dimter, S., Rukavina, T.: Characterization of cement stabilized pavement layers with ultrasound testing, Technical Gazette, 2016, 23(2), pp. 447 – 53, doi: [10.17559/TV-20140916142451](https://doi.org/10.17559/TV-20140916142451)
- [10] Liu, L., Wang, C., Liang, Q., Chen, F., Zhou, X.: A state-of-the-art review of rubber modified cement-based materials: Cement stabilized base, Journal of Cleaner Production, 392(136270), 2023, doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136270>
- [11] Agrawal, D., Waghe, U., Ansari, K., Dighade, R., Amran, M., Qader, D.N., et al.: Experimental effect of pre-treatment of rubber fibers on mechanical properties of rubberized concrete, Journal of Materials Research and Technology, 23, pp. 791 - 807, doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.027>
- [12] Noor Azline, M.N., Nabilah, A.B., Nor Azizi, S., Farah Nora Aznieta, A.A.: A comparative investigation on mechanical strength of blended concrete with surface modified rubber by chemical and non-chemical approaches, Case Studies in Construction Materials, 17(e01444), 2022, doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01444>
- [13] Assaggaf, R.A., Maslehuddin, M., Al-Dulaijan, S.U., Al-Osta, M.A., Ali, M.R., Shameem, M.: Cost-effective treatment of crumb rubber to improve the properties of crumb-rubber concrete, Case Studies in Construction Materials, 16(e00881), doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00881>
- [14] Yousf, O., Swilam, A., Tahwia, A.M.: Performance of crumb rubber concrete made with high contents of heat pre-treated rubber and magnetized water, Journal of Materials Research and Technology, 23, pp. 2160 - 2176, 2023, doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.146>
- [15] Institut građevinarstva Hrvatske, Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Knjiga III Kolnička konstrukcija, Zagreb: 2001.
- [16] European committee for standardization. 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.
- [17] EN 12504-4:2021 Ispitivanje betona u konstrukcijama - 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa. Brussels: 2021.
- [18] European committee for standardization. HRN EN 13286-41- dio: Ispitna metoda za određivanje tlačne lvrstoće hidrauličnim vezivom vezanih mješavina. Brussels, Belgium: 2021.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.02>

## UTJECAJ VLAGE I PROCESA PEČENJA NA ZAŠTITU PUNE OPEKE OD ELEKTROMAGNETSKOG NEIONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

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

(1) Sveučilište Josip Juraj Strossmayer u Osijeku, Građevinski i Arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, 31000 Osijek, Hrvatska

(2) Sveučilište Josip Juraj Strossmayer u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Ul. Kneza Trpimira 2B, 31000 Osijek, Hrvatska

### Sažetak

U današnjem modernom svijetu umjetni izvori neionizirajućeg elektromagnetskog zračenja postali su neizostavan dio naših života. Pitanje potencijalne zdravstvene ugroženosti prilikom izlaganja takvoj vrsti zračenja ostaje tema rasprave među znanstvenicima. U ovom radu analizira se utjecaj pečenja opeke i povećanja vlage u punoj opeci na rezultate zaštite od elektromagnetskog zračenja pri frekvencijama od 1.5 GHz do 6 GHz. Rezultati su pokazali kako vlažna opeka ima veliku sposobnost prigušenja elektromagnetskog zračenja, dok se sušenjem i pečenjem zaštita smanjuje. Dodavanje vlage u materijal povećalo je elektromagnetsku zaštitu, dok je pečenje rezultiralo njezinim smanjenjem. Rezultati su u suglasju s literaturom gdje je električna vodljivost materijala ključni faktor u elektromagnetskoj zaštiti. Ovaj rad pruža dodatno razumijevanje utjecaja vlage i pečenja na elektromagnetsku zaštitu materijala što može biti korisno za projektiranje nosivih konstrukcijskih elemenata s visokom učinkovitošću zaštite od elektromagnetskog zračenja.

*Ključne riječi: opeka, elektromagnetsko zračenje, elektromagnetska zaštita, konduktivnost*

## THE INFLUENCE OF HUMIDITY AND THE FIRING PROCESS ON THE PROTECTION OF SOLID BRICKS FROM ELECTROMAGNETIC NON-IONIZING RADIATION

### Abstract

In today's modern world, artificial sources of nonionizing electromagnetic radiation have become an indispensable part of our lives. The issue of potential health risks from exposure to this type of radiation remains a topic of discussion among scientists. In this paper, the influence of brick firing and the increase in humidity in solid bricks on the results of protection against EM radiation is analyzed at frequencies from 1.5 GHz to 6 GHz. Wet brick has the greatest ability to attenuate electromagnetic radiation, while drying and firing reduce this protection. Results showed that adding moisture to the material increased the electromagnetic shielding, while firing resulted in decreased shielding. The results are in agreement with the literature, where the electrical conductivity of the material is a key factor in electromagnetic protection. This work provides additional understanding of the influence of moisture and firing on the electromagnetic shielding of materials, which can be useful for the design of load-bearing structural elements with high efficiency shielding from electromagnetic radiation.

*Keywords: brick, electromagnetic radiation, electromagnetic shielding, electrical conductivity*

## **1. Uvod**

U današnjem, sve umreženijem svijetu, uređaji koji emitiraju elektromagnetsko zračenje postali su neizostavni dijelovi naših života. Bežični internet, 3G, 4G, 5G mreže, mobilni telefoni, radari i GPS sustavi samo su neki od izvora koji stvaraju elektromagnetske valove i čine naše živote lakšim i ugodnijim. Elektromagnetsko zračenje (EM) može se definirati kao zračenje u obliku električnih i magnetskih valova koji putuju brzinom svjetlosti i prenose energiju. Elektromagnetsko zračenje dijelimo na dvije vrste: ionizirajuće zračenje i neionizirajuće zračenje. Ovisno o frekvenciji, energija koju elektromagnetski valovi prenose se mijenja: što je frekvencija veća, energija koja se prenosi elektromagnetskim valom je veća. Ionizirajuće zračenje (gama zrake, rendgenske zrake...) zbog velike energije koju prenosi, ima sposobnost izbijanja elektrona iz jezgre čime se stanice u tijelu nepovratno oštećuju [1]. S druge strane, neionizirajuće zračenje je zračenje kojim smo gotovo u svakom trenutku izloženi, no prenosi puno manje količine energije. Kako se razvitkom električnih uređaja značajno povećala razina neionizirajućeg elektromagnetskog zračenja u prirodi [2], počela su se postavljati pitanja o mogućoj povezanosti izlaganja EM neionizirajućem zračenju sa zdravstvenim problemima poput raka, neuroloških problema i slično. Do sada je objavljen velik broj znanstvenih istraživanja na ovu temu, no zaključci su dosta često nedosljedni i kontradiktorni. Određeni broj znanstvenika u svojim radovima tvrdi kako neionizirajuće zračenje ne šteti ljudskom zdravlju ([3], [4]), dok ostali znanstvenici tvrde kako se dugoročnim izlaganjem neionizirajućem zračenju stvaraju potencijalno vrlo ozbiljne posljedice za zdravlje ([5]–[7]). Upravo iz navedenih razloga došlo je do porasta svijesti o potrebi kontrole razine ovog zračenja, kao i svijest o potrebi smanjenja EM zračenja, posebno u prostoru u kojem ljudi žive. Budući da dugoročni učinci još nisu jasno utvrđeni, iz predostrožnosti je osmišljeno nekoliko načina za zaštitu od neionizirajućeg EM zračenja. Posljednjih godina projektiranje nosivih konstrukcijskih elemenata koji imaju sposobnost visoke učinkovitosti zaštite od EM zračenja predmet je raznih istraživanja. Materijal djeluje kao štit protiv elektromagnetskih smetnji jer ograničava ulazak elektromagnetskih polja u prostor reflektirajući ih ili apsorbirajući barijerom od vodljivog materijala. Zaštita od elektromagnetskog zračenja ponekad može biti zahtjevan zadatak. Na elektromagnetska svojstva materijala utječu mnogi čimbenici: debljina materijala, električna vodljivost, poroznost, temperatura, magnetizam itd. Ovaj rad istražuje utjecaj vlage na sposobnost elektromagnetske zaštite pune opeke na frekvencijskom području od 1.5 GHz do 6 GHz. Također, u radu će se istražiti i sposobnost elektromagnetske zaštite sirove i pečene opeke na istom frekvencijskom području.

## **2. Eksperimentalni dio**

### **2.1. Materijali**

Glina je dobavljena iz lokalne tvornice opeke. Ispitni uzorci kružnog su poprečnog presjeka promjera 15 cm i debljine 12 cm. Debljina 12 cm usvojena je kako bi simulirala debljinu standardne pune opeke. Dobavljena glina miješana je s vodom kako bi se postigla željena

obradivost (oko 22 %). Nakon postizanja željene obradivosti, za osiguranje jednake zbijenosti svakog uzorka korišten je uređaj modificirani proctor. Nakon ukalupljivanja i izrade uzoraka, oni su postepeno sušeni u komori s povećanim postotkom vlage u zraku kako bi se izbjegla pojava pukotina. Nakon sušenja izloženi su temperaturama od 850 °C u električnoj peći.



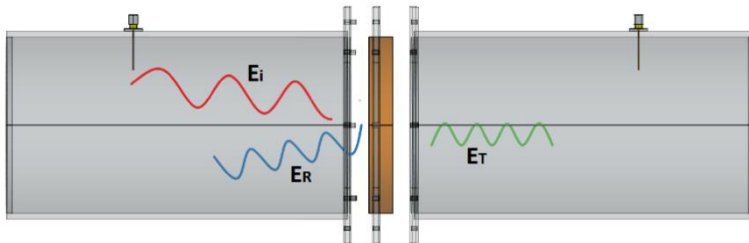
**Slika 1.** Električna peć



**Slika 2.** Pečena opeka

## 2.2. Metode ispitivanja

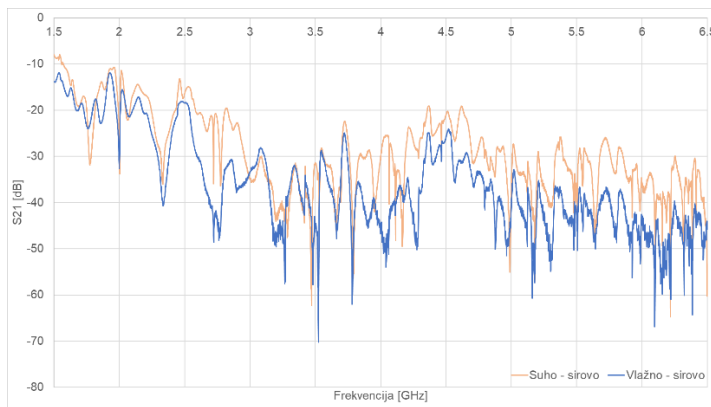
Mjerenje elektromagnetske zaštite rađeno je pomoću Anritsu ms2038c - ručnog vektorskog mrežnog analizatora te spektralnog analizatora i eksperimentalne postavke koja se sastoji od dva valovoda unutarnjeg promjera 16 cm. Mjerni uređaj sadržavao je dva aluminijska kružna valovoda između kojih je mjereni uzorak postavljen u čeličnu ploču. Elektromagnetska zaštita mjerila se pri frekvencijama 1.5 GHz – 6.5 GHz.



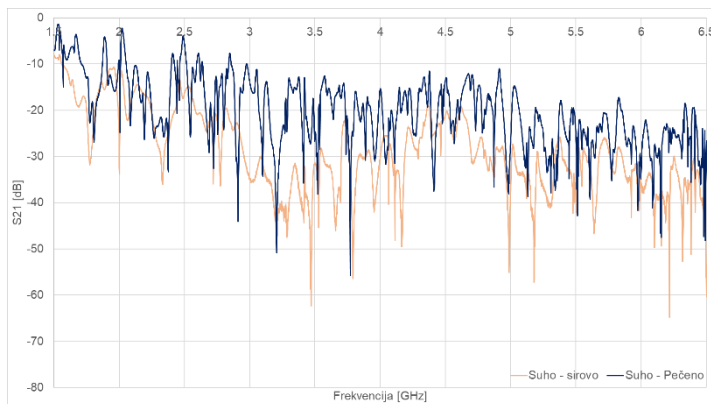
**Slika 3.** Eksperimentalna postavka

## 2.4. Rezultati eksperimenta

Rezultati mjerenja umanjavanja transmisije prikazani su na Slici 4. i 5. u nastavku:



Slika 4. Usporedba zaštite suhe i vlažne opeke



Slika 5. Usporedba zaštite sirove i pečene opeke

Tablica 1. Rezultati mjerenja EM zaštite

Vrijednost	Suho pečeno		Suho sirovo		Vlažno sirovo	
	Iznos [dB]	Frekvencija [GHz]	Iznos [dB]	Frekvencija [GHz]	Iznos [dB]	Frekvencija [GHz]
Prosjek	-20.29	-	-28.95	-	-35.84	-
Minimum	-55.78	3.77	-64.77	6.22	-70.27	3.52
Maksimum	-1.37	1.53	-7.98	1.54	-11.90	1.92

Slike 4. i 5. prikazuju usporedbu zaštite za suhe i vlažne sirove opeke te usporedbu zaštite sirove i pečene suhe opeke. Iz navedenih rezultata može se vidjeti kako opeke koje su izložene vlazi pokazuju najveće prigušenje EM zračenja. Prema Tablici 1. prosječna vrijednost zaštite vlažne opeke iznosila je -35.84 dB, dok je najveće prigušenje ostvareno u iznosu od -70.27 dB, pri frekvenciji od 3.52 GHz. Sirova opeka bez vlage pokazala je nešto niže vrijednosti prigušenja pa je tako prosječni iznos zaštite bio -28.95 dB, dok je najniže vrijednosti zaštite ostvarila pečena opeka, -20.29 dB.

### **3. Zaključak**

U radu je analizirana uloga vlage u zaštiti od elektromagnetskog zračenja, kao i učinak pečenja opeke na ukupnu zaštitu od elektromagnetskog zračenja. Prema prikazanim rezultatima može se zaključiti kako se kroz procese proizvodnje opeke postepeno smanjuje EM zaštita. U prvom koraku izrade opeka je vlažna zbog potrebne obradivosti i tada ima najveću sposobnost prigušenja EM zračenja. Sušenjem se ona postepeno smanjuje, da bi se posljednjim korakom, pečenjem, zaštita u najvećoj mjeri smanjila. Prilikom unošenja vlage u materijal ostvarilo se povećanje zaštite od prosječno 6.39 dB što je primjetna razlika. Također, valja napomenuti kako zaštita ovisi i o postoku vlage u materijalu. Procesom pečenja, dolazi do smanjenja zaštite prosječno od 8.66 dB. Ovakvi rezultati su u suglasju s literaturom. Naime, vrlo važan faktor u elektromagnetskoj zaštiti materijala je električna konduktivnost. Opće je poznato kako voda dobro provodi struju i samim time vlažniji materijali imaju veću konduktivnost što povećava EM zaštitu. Nadalje, procesom pečenja dolazi do složenih kemijskih procesa poput vitrifikacije i sinteriranja, gdje taljenjem gline i stvaranjem „staklene“ forme dolazi do smanjenja konduktivnosti.

### **Literatura**

- [1] Omer, H.: Radiobiological effects and medical applications of non-ionizing radiation, Saudi Journal of Biological Sciences, vol. 28, no. 10, pp. 5585 – 5592, 2021, doi: 10.1016/j.sjbs.2021.05.071.
- [2] Bandara, P. and D. O. Carpenter: Planetary electromagnetic pollution: it is time to assess its impact, The Lancet Planetary Health, vol. 2, no. 12, pp. e512 – e514, 2018, doi: 10.1016/S2542-5196(18)30221-3.
- [3] Haarala, C., M. Bergman, M. Laine, A. Revonsuo, M. Koivisto, and H. Hämäläinen: Electromagnetic field emitted by 902 MHz mobile phones shows no effects on children's cognitive function, Bioelectromagnetics, vol. 26, no. SUPPL. 7, pp. 144 – 150, 2005, doi: 10.1002/bem.20142.
- [4] Adey, W. R. *et al.*: Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumors of the central nervous system in Fischer 344 rats exposed to frequency-modulated microwave fields, Cancer Research, vol. 60, no. 7, pp. 1857 – 1863, 2000.
- [5] Khurana, V. G., L. Hardell, J. Everaert, A. Bortkiewicz, M. Carlberg, and M. Ahonen: Epidemiological evidence for a health risk from mobile phone base stations, International Journal of Occupational and Environmental Health, vol. 16, no. 3, pp. 263 – 267, 2010, doi: 10.1179/oeh.2010.16.3.263.
- [6] Calvente, I., M. F. Fernandez, J. Villalba, N. Olea, and M. I. Nuñez: Exposure to electromagnetic fields (non-ionizing radiation) and its relationship with childhood leukemia: A systematic review, Science of the Total Environment, vol. 408, no. 16, pp.



- 3062 – 3069, 2010, doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.03.039.
- [7] Havas, M.: When theory and observation collide: Can non-ionizing radiation cause cancer?, *Environmental Pollution*, vol. 221, pp. 501 – 505, 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2016.10.018.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.17>

## PRIMJENA ODABRANIH MODELA PUZANJA KOD LIJEPLJENIH LAMELIRANIH NOSAČA OD GRABA

Jelena Lovrić Vranković<sup>1</sup>, Ivica Boko<sup>1</sup>, Ivana Uzelac Glavinić<sup>1</sup>

(1) *Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Hrvatska, [jlovric@gradst.hr](mailto:jlovric@gradst.hr);  
[iboko@gradst.hr](mailto:iboko@gradst.hr); [iuzelac@gradst.hr](mailto:iuzelac@gradst.hr)*

### Sažetak

U ovom radu prikazana je primjena tri odabrana modela za opisivanje puzanja lijepljenih lameliranih nosača (LLN) izrađenih od graba (*Carpinus betulus* L.) i opterećenih konstantnom silom tijekom razdoblja od tri mjeseca. Odabrani modeli su 'power law', Norton-Bailey i Burgerov model. Istraživanja su provedena u Laboratoriju za konstrukcije Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije (FGAG) u Splitu. LLN-i su ispitani na savijanje u 4 točke na način da su opterećeni silom koja iznosi 30 % maksimalne sile dobivene prethodno provedenim kratkotrajnim testovima na gredama istih dimenzija. Usporedbom koeficijenata determinacije dobivenih programskim paketom Matlab može se uočiti da se sva tri modela mogu koristiti za predviđanje ponašanja LLN-a izloženog dugotrajnom konstantnom opterećenju.

*Cljučne riječi: puzanje, lijepljeno lamelirano drvo, grab*

## THE APPLICATION OF SELECTED CREEP MODELS FOR GLULAM MADE FROM EUROPEAN HORNBEAM

### Abstract

This paper presents the application of selected models in order to determine the creep behavior of glued laminated timber beams (glulam) made from European hornbeam (*Carpinus betulus* L.) and loaded with a constant force during a period of three months. The selected models are the 'power law', Norton-Bailey, and Burger's model. The investigations were performed in the Construction Laboratory of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy in Split. Four-point bending tests were performed on glulam beams with an applied load level of 30% of the maximum force obtained from previously conducted short-term tests. The comparison was made between the coefficients of determination obtained in Matlab for each model. It can be concluded that all three of the selected models can be successfully applied in order to describe the creep behavior of glulam beams under long-term loading.

*Keywords: creep, glued laminated timber, European hornbeam*

## 1. Uvod

Tijekom nekoliko posljednjih desetljeća lijepljeni lamelirani nosači (LLN) dominantno su se, s obzirom na veliku dostupnost, povoljna mehanička svojstva i laku obradivost, izrađivali od drva četinjača (jela, smreka, bor, itd.). Klimatske promjene i kontinuirano pošumljavanje četinjača utjecali su na porast udjela tvrdih listača u europskim šumama što je potaknulo intenzivna istraživanja lijepljenih lameliranih nosača, kao i ostalih proizvoda na bazi tvrdih listača. Europski standardi sadrže zahtjeve za proizvodnju i projektiranje lameliranih nosača od drva četinjača [1, 2]. U 2021. godini Europska organizacija za tehničko ocjenjivanje izdala je dokument European Assessment Document (EAD) [3] za LLN od tvrdog drva, no s ograničenjem na nekoliko vrsta tvrdog drva. Sukladno tome, provedena su brojna istraživanja kako bi se dokazao potencijal primjene tvrdih drva te formirao jedinstveni europski standard za LLN od tvrdog drva.

Granično stanje uporabivosti (GSU) često je odlučujući kriterij prilikom dimenzioniranja drvenih elemenata. Sukladno Eurocodu 5, GSU definira proračun konačnog progiba  $u_{fin}$  uslijed stalnog opterećenja sukladno sljedećem izrazu (1):

$$u_{fin} = u_{inst}(1 + k_{def}) \quad (1)$$

gdje  $u_{inst}$  predstavlja trenutni progib, dok  $k_{def}$  predstavlja faktor deformacije definiran ovisno o razredu uporabe, odnosno vlažnosti. Očekivane vrijednosti  $k_{def}$  su između 0,6 za razred uporabe 1 i vrijednosti 2 za razred uporabe 3 gdje je progib od puzanja dvostruko veći od trenutnog progiba. Općenito, puzanje materijala može se opisati u tri faze. Prva faza uključuje kontinuirani rast deformacije (opadanje brzine deformacije), sekundarna faza obuhvaća linearnu krivulju puzanja (konstantna brzina deformacije), dok tercijarna faza uključuje nagli porast brzine deformacije i lom.

S obzirom da je drvo prirodan i anizotropan materijal, mnogi parametri utječu na puzanje drvenih elemenata kao što su: vlažnost, temperatura, relativna vlažnost, vrsta opterećenja, veličina elementa, čvorovi, otklon vlaknaca, itd. Sukladno tomu, ne postoji standardizirana metoda za opisivanje vremenski ovisnog ponašanja drvenih elemenata uslijed konstantnog opterećenja. Eksperimentalno je potvrđeno da se drvo ponaša kao linearno viskoelastičan materijal pri nižim vrijednostima naprezanja [4-6]. Isto tako, dugotrajna opterećenja niža od 45 - 60 % maksimalne sile dobivene kratkotrajnim testom ne uzrokuju otkazivanje elementa [7]. Trenutno, prema saznanjima autora ne postoje istraživanja provedena na lameliranim nosačima od graba osim studije Moosavi-ja [8] koji je proveo testove puzanja na malim uzorcima od punog drva graba.

Nekoliko matematičkih i reoloških modela razvijeno je kako bi se procijenili parametri puzanja linearnih i nelinearnih materijala u uvjetima s konstantnom i promjenjivom temperaturom te relativnom vlažnosti. Dosadašnje studije opisuju puzanje materijala u različitim aspektima koji uključuju progibe, popustljivost, relativni progib, relativne deformacije, itd. [9, 10]. Neki od modela uspoređeni u ovom radu su 'power law', Norton-Bailey i Burgerov model. Burgerov model ili četveroparametarski model s parametrima a, b, c i d jedan je od najčešće korištenih

reoloških modela za opisivanje vremenski ovisnih deformacija viskoelastičnih materijala, a prikazan je sljedećim izrazom (2):

$$\varepsilon(t) = a + b(1 - e^{-ct}) + dt \quad (2)$$

Nekoliko autora [7,9] pokazalo je kako je 'power law' funkcija najprikladnija za opisivanje puzanja uzoraka od smreke i bukve uslijed savijanja, a definirana je jednačbom (3):

$$\varepsilon(t) = at^b + \varepsilon_0 \quad (3)$$

Norton-Bailey funkciju definiramo koristeći izraz (4):

$$\varepsilon(t) = a\sigma^b t^c \quad (4)$$

U ovom radu prikazani su parametri i koeficijenti determinacije za svaku od prethodno navedenih jednačbi u usporedbi s krivuljama puzanja dobivenim eksperimentalnim testovima na dva LLN-a (LLN-1 i LLN-2) od graba.

## 2. Eksperimentalno ispitivanje

### 2.1. Kratkotrajni testovi na savijanje

LLN-i proizvedeni su od lokalnog drva grab (*Carpinus betulus* L.) od strane tvrtke Drvene konstrukcije d.o.o. Udio graba u šumama RH je 8,4 %, a dosada se, uglavnom, koristio za ogrjev. Prije nanošenja ljepila lamele su površinski obrađene blanjanjem na debljinu od 2 cm nakon čega je izmjerena vlažnost pojedine lamele (8 - 15 %) i gustoća (790 kg/m<sup>3</sup>). Prilikom izrade LLN-a korišteno je ljepilo melamin-urea-formaldehid (Prefere 4535+5035). Konačno, LLN-i su blanjani sa svake strane kako bi se dobili nosači dimenzija 60x80x1700 mm, bez zupčastog spoja. Testovi na savijanje u 4 točke provedeni su u Laboratoriju za konstrukcije (FGAG) na okviru Automax Multitest [11, 12]. Opterećenje se simetrično nanosilo s dva cilindra na način da se maksimalna sila ( $F_{max}$ ) dosegne u vremenskom intervalu od 300±120 s. Progibi su mjereni LVDT-ima povezanim s HBM akvizicijskim sustavom. Izmjerena prosječna maksimalna sila pri kojoj su grede otkazale iznosila je 30,64 kN.

### 2.2. Puzanje LLN-a

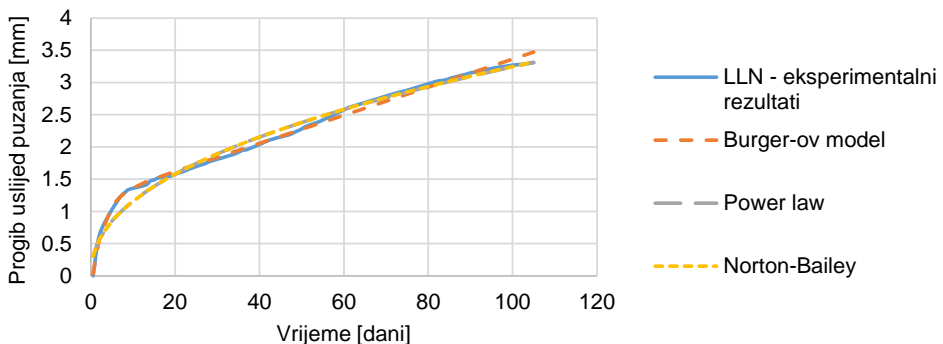
LLN-i su kondicionirani u identičnim uvjetima prije provođenja testova puzanja u Laboratoriju za konstrukcije (FGAG). Grede raspona 1500 mm postavljene su simetrično na ležajeve od inox-a i opterećene na savijanje u 4 točke s konstantnom silom koja iznosi 30 %  $F_{max}$ . Opterećenje se nanosilo betonskim kockama kako je prikazano na Slici 1. Početni elastični vertikalni progib očitavan je neposredno nakon nanošenja opterećenja s mikrourom Mituyoto, s preciznošću od 0,01 mm. Progibi su očitavani svaki dan tijekom razdoblja od 3 mjeseca. Isto tako, temperatura i relativna vlažnost laboratorija, kao i vlažnost nosača, očitavani su na dnevnoj razini.



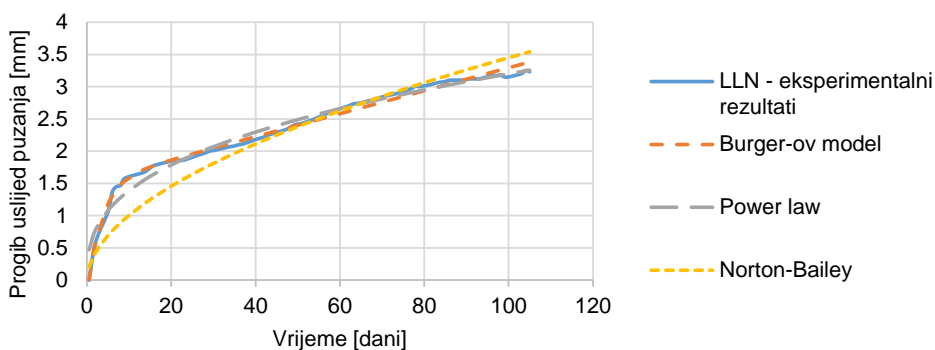
Slika 1. LLN opterećen silom od  $0,3F_{max}$

### 3. Rezultati

Testovi puzanja provedeni su kako bi se definiralo vremenski ovisno ponašanje LLN-a izrađenih od graba, a za koji ne postoje definirani zahtjevi za proizvodnju i projektiranje u Europskim standardima kao ni tehničko odobrenje. Sukladno očitanim vrijednostima temperature i relativne vlažnosti, laboratorijski uvjeti odgovaraju razredu uporabe 1 prema Eurocodu 5. S obzirom na razinu opterećenja koja odgovara  $0,3F_{max}$ , nijedna greda nije otkazala, odnosno nije došlo do pojave tercijarne faze puzanja. Grafovi progib-vrijeme za oba nosača LLN-1 (Slika 2.) i LLN-2 (Slika 3.) dobiveni su na osnovu očitanih vrijednosti progiba u vremenu te uspoređeni podešavanjem ("fitanjem") podataka s tri funkcije puzanja koristeći nelinearnu metodu najmanjih kvadrata uz pomoć Matlab Curve Fitter. U tablici 1. dani su parametri funkcije kao i koeficijent determinacije za svaku od tri funkcije puzanja i to 'power law', Norton-Bailey i Burger. Prema grafovima koji prikazuju očitane vrijednosti progiba tijekom tri mjeseca može se uočiti primarna faza puzanja kao i dio sekundarne faze. Zaključeno je da se sva tri odabrana modela mogu primijeniti za opisivanje vremenski ovisnog ponašanja LLN-a od graba. Navedeno je potrebno potvrditi na većem broju uzoraka.



Slika 2. Graf ovisnosti progiba uslijed puzanja o vremenu za LLN-1



Slika 3. Graf ovisnosti progiba uslijed puzanja o vremenu za LLN-1

Tablica 1. Parametri za pojedini nosač LLN-1 i LLN-2

Model	Parametar	LLN-1	LLN-2
Norton-Bailey	a	-0,2134	-0,2346
	b	1,401	1,745
	c	0,3648	0,2841
	d	0,02175	0,01783
	R <sup>2</sup>	0,99	0,99
Power law	a	0,4143	0,6038
	b	0,4467	0,362
	R <sup>2</sup>	0,98	0,98
Norton-Bailey	a	2,107	0,02018
	b	-0,4514	0,7408
	c	0,4477	0,5356
	R <sup>2</sup>	0,98	0,86

## Zahvala

Ovo istraživanje djelomično je 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] Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2004.
- [2] EN 14080; Timber Structures - Glued Laminated Timber and Glued Solid Timber - Requirements, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2013.
- [3] EAD 130320-00-0304 Glued Laminated Timber made of solid hardwood, European Organisation for Technical Assessment (EOTA), June 2018.
- [4] Bach, L.: Nonlinear mechanical behavior of wood in longitudinal tension, *Forest Prod. J.*, 18, pp. 60 - 66, 1968
- [5] Grossman, P.: Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behavior, *Wood Sci. Technol.*, 10, pp. 163-168, 1976, doi: 10.1007/BF00355737
- [6] Schaffer, E.: Modeling the creep of wood in a changing moisture environment, *Wood Fiber Sci.*, 3, pp. 232 - 235, 1972
- [7] Clouser, W.S.: Creep of small wood beams under constant bending load, Forest Product laboratory, Forest Service, 1959
- [8] Moosavi, V., Eslam, H.K., Bazayr, B., Najafi, A., Talaeepoor, M.: Bending Creep Behaviour of Hornbeam Wood, *Drvna industrija*, 67, pp. 341 - 350, 2016, doi:10.5552/drind.2016.1609
- [9] Holzer, S.M., Loferski, J.R., Dillard, D.A.: A review of creep in wood: Concepts relevant to develop long-term behavior predictions for wood structures, *Wood and Fiber Science*, 21(4), pp. 376 - 392, 1989
- [10] Fu, H., Dun, M., Wang, H., Wang, W., Ou, R., Wang, Y., Liu, T., Wang, Q.: Creep response of wood flour-high-density polyethylene/laminated veneer lumber coextruded composites, *Construction and Building Materials*, 237, 117499, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117499
- [11] Uzelac Glavinić, I., Boko, I., Lovrić Vranković, J., Torić, N., Abramović, M.: An Experimental Investigation of Hardwoods Harvested in Croatian Forests for the Production of Glued Laminated Timber, *Materials*, 16(5), 1843, 2023, doi:10.3390/ma16051843
- [12] Boko, I., Uzelac Glavinić, I., Boko, I., Torić, N., Hrzić, T., Lovrić Vranković, J.: Potential of hardwoods harvested in Croatian forests for the production of glued laminated timber, *International Conference on Building Materials and Construction*, Kyoto, Japan, March 17 - 20, 2023



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.22>

## STROJNO UČENJE I DALJINSKA ISTRAŽIVANJA ZA MAPIRANJE PROMETNICA U SPLITSKO-DALMATINSKOJ ŽUPANIJU

Selena Knežić Buhovac<sup>1</sup>, Ljiljana Šerić<sup>2</sup>, Antonia Ivanda<sup>2</sup>

(1) Sveučilište u Mostaru, Fakultet strojarstva, računarstva i elektrotehnike, Bosna i Hercegovina, [selena.knezic@fsre.sum.ba](mailto:selena.knezic@fsre.sum.ba)

(2) Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Hrvatska, {ljiljana, asenta00}@fesb.hr

### Sažetak

U ovom istraživačkom radu prikazana je metodologija za tematsko mapiranje prometnica u Splitsko-dalmatinskoj županiji. U svrhu ostvarivanja cilja korišten je satelitski snimak jedne scene Splitsko-dalmatinske županije Sentinel-2 satelita i podaci o položaju prometnica iz OpenStreetMap (OSM) projekta. Uzimajući u obzir činjenicu da su podaci iz OSM projekta neslužbeni i mogu biti nepouzdan izvor podataka, ovo istraživanje je usmjereno na modeliranje, mapiranje i evaluaciju uspješnosti predviđanja cesta primjenjujući algoritme strojnog učenja. Mjere evaluacije pokazale su da je prometnice moguće prepoznati iz satelitskih podataka korištenjem nelinearnih modela strojnog učenja. Budući da ovaj rad pruža osnovu koristeći značajke jednog piksela, u daljnjim istraživanjima može se istražiti primjena naprednih algoritama koji uzimaju u obzir i okolne piksele, i njihov kontekst kako bi se postigla još veća preciznost mapiranja.

*Ključne riječi: daljinska istraživanja, strojno učenje, klasifikacija*

## MACHINE LEARNING AND REMOTE SENSING FOR ROAD MAPPING INSPLIT-DALMATIA COUNTY

### Abstract

This research paper presents a methodology for thematic mapping of roads in Split-Dalmatia County. To achieve the goal, a satellite image of a scene in Split-Dalmatia County from the Sentinel-2 satellite and road position data from the OpenStreetMap (OSM) project were used. Considering that the data from the OSM project is unofficial and can be an unreliable data source, this research focuses on modeling, mapping, and evaluating the success of road predictions using machine learning algorithms. Evaluation measures have shown that roads can be identified from satellite data using non-linear machine learning models. Since this paper provides a foundation using single-pixel features, further research can explore the application of advanced algorithms that take into account neighboring pixels and their context to achieve even greater mapping accuracy.

*Keywords: remote sensing, machine learning, classification*



## **1. Uvod**

Daljinska istraživanja (engl. *Remote Sensing*) opisana su mnogim definicijama u brojnim literature. Kada iščitamo i usporedimo neke od definicija, dolazimo do jednog zaključka, a to je da su daljinska istraživanja prikupljanja informacija na daljinu [1]. Službena definicija bi bila da su daljinska istraživanja proces dobivanja podataka o kopnenim i vodenim površinama Zemlje pomoću senzora smještenih na zrakoplovima ili satelitima. Ti senzori hvataju elektromagnetsku energiju koju emitira ili reflektira promatrana površina [2]. Istraživanje daljinskog očitavanja sve više stavlja naglasak na klasifikaciju pomoću tehnika strojnog učenja. Algoritmi strojnog učenja imaju sposobnost modeliranja složenih uzoraka klasa, mogu raditi s različitim ulaznim podacima i ne polaze od pretpostavki o distribuciji podataka (tj. neovisni su o parametrima). Općenito, brojna istraživanja su pokazala da ove metode često postižu veću točnost u usporedbi s tradicionalnim klasifikatorima koji se oslanjaju na parametre, posebno u slučajevima kada se radi s kompleksnim podacima koji imaju veliki broj značajki, odnosno prediktorskih varijabli [3]. Daljinska istraživanja pružaju mnoštvo podataka o Zemlji i njezinoj površini. S druge strane, strojno učenje predstavlja snažan alat za modeliranje i tematsko mapiranje tih podataka. Kombinacija ovih dvaju tehnologija omogućuje nam da iskoristimo bogatstvo podataka dobivenih daljinskim očitavanjem i primijenimo sofisticirane algoritme strojnog učenja kako bismo stvorili detaljne i precizne tematske karte. Strojno učenje omogućuje nam modeliranje složenih uzoraka klasa i rad s raznolikim ulaznim podacima, što doprinosi većoj točnosti u odnosu na tradicionalne metode. Ova kombinacija otvara vrata novim mogućnostima u istraživanju i razumijevanju Zemlje te pruža vrijedne informacije za odlučivanje u različitim područjima kao što su upravljanje okolišem ili npr. urbanizacija. U ovom radu bit će predstavljena metodologija za tematsko mapiranje prometnica Splitsko-dalmatinske županije. Podaci za strojno učenje dobiveni su iz izvora OpenStreetMap (OSM), koji nisu službeni i stoga se smatraju nepouzdanim. Bit će prikazana metodologija modeliranja, mapiranja evaluacije uspješnosti predviđanja cesta u Splitsko-dalmatinskoj županiji pomoću različitih algoritama strojnog učenja.

## **2. Metodologija**

### **2.1. Područje istraživanja**

Republika Hrvatska je podijeljena na 21 županiju. Površinom najveća je Splitsko-dalmatinska županija koja je i fokus ovog istraživanja. Smještena u središnjem dijelu Jadranske obale, prostire se na površini od 14.106,40 km<sup>2</sup> [4]. Kopneni dio ove županije obuhvaća površinu od 4.523,64 km<sup>2</sup> i vodeća je u Republici Hrvatskoj po dužini županijskih i lokalnih cesta. Splitsko-dalmatinska županija ima razgranatu cestovnu mrežu koja uključuje autoceste, državne ceste, županijske ceste i lokalne ceste. Udio županijskih cesta županije u Republici Hrvatskoj iznosi otprilike 8,6 % (814,6 km od ukupno 9.486,7 km), dok je udio lokalnih cesta oko 10,5 % (925,3 km od ukupno 8.787 km) [5].

## **2.2. Set podataka**

Za potrebe ovoga rada korištena je snimka scene Splitsko-dalmatinske županije preuzete sa Sentinel hub-a, a snimljene pomoću satelita Sentinel-2. Snimka je preuzeta na datum kada je bilo manje oblaka kako bi bila što bolja vidljivost cesta. Podaci o prometnicama u Splitsko-dalmatinskoj županiji preuzete su s OpenStreetMaps (OSM). Dio gdje postoje ceste bit će označen brojem 1, a gdje se ne prepoznaje cesta brojem 0.

### **2.2.1. Sentinel-2**

Sentinel-2 sateliti za promatranje Zemlje opremljeni su sustavima za multispektralno snimanje (MSI) i prikupljaju optičke slike. Snimke visoke prostorne rezolucije (do 10 metara) putem 12 spektralnih frekvencijskih kanala, uključujući vidljive, infracrvene i termalne raspone spektra, a ponavlja snimanje cijele Zemljine površine svakih pet dana. Sentinel-2A i Sentinel-2B su sateliti koji imaju isti instrument MSI te se nalaze u istoj sinkronoj orbiti Sunca, ali su postavljeni na suprotnim stranama [6]. Ovi sateliti su u vlasništvu i upravljaju Europske svemirske agencije (ESA), a proizvedeni su od strane konzorcija na čelu s Airbus Defence and Space (Airbus DS) [7]. Njihova misija podržava različite usluge i primjene, uključujući praćenje poljoprivrede, upravljanje katastrofama i klasifikaciju pokrova/zemljišta [8]. Kroz Copernicus program Europske unije podaci o zemljinoj površini prikupljeni ovim, ali i drugim satelitima, otvoreni su za korištenje cijeloj zajednici. Snimke s ovog instrumenta dostupne su kroz servis Sentinel Hub u geo-referenciranom formatu.

### **2.2.2. OpenStreetMap (OSM)**

OpenStreetMap (OSM), osnovan 2004. godine, razvio se iz lokalnog projekta u globalnu kartu koja ima široku prmjenu i sadrži visokokvalitetne podatke. Trenutno je OSM snažan konkurent Google kartama. Oslanja se na online suradnju korisnika koji koriste ručne GPS uređaje, snimke visoke razlučivosti iz zraka i individualno prostorno kognitivno znanje kao temeljnu geografsku referencu za stvaranje, uređivanje, upravljanje i održavanje geografskih informacija. Dostupan je svim korisnicima putem interneta diljem svijeta [8].

Podaci iz oba korištena izvora svedeni su na istu rezoluciju. Iščitavanjem pomoću skripte napisane u Python programskom jeziku kreiran je set podataka u kojem je svaki piksel zemljine površine veličine 11 m x 15 m opisan s vrijednostima reflektanci u 12 frekvencijskih područja detektiranih s multispektralnim instrumentom Sentinel-2 satelita i vrijednosti 0 ili 1 koja govori nalazi i se na tom pikselu nalazi prometnica ili ne.

## **2.3. Algoritmi**

Klasifikacija je proces koji se koristi za grupiranje podataka u različite klase prema određenim kriterijima. Drugim riječima, klasifikacija je način generaliziranja podataka prema različitim karakteristikama [9]. U ovom radu cilj nam je kreirati klasifikator koji će temeljem reflektanci u 12 frekvencijskih područja (eksplanatorne varijable) predvidjeti prisutnost prometnice na zemljinoj površini. Set podataka koji je opisan u prijašnjoj sekciji podijeljen je na dva podseta: trening (80 %) i test (20 %) podaci. Kako bismo odabrali reprezentativne pristupe klasifikaciji

temeljene na strojnom učenju i vidjeli koji algoritmi daju najbolje rezultate u našem slučaju, istražili smo linearne, probabilističke i nelinearne pristupe. Za potrebe ovoga istraživanja koristili smo sljedeće klasifikacijske algoritme:

- *Naivni Bayesov klasifikator (engl. Naïve Bayes)* - radi na principu uvjetne vjerojatnosti i temelji se na Bayesovom teoremu pretpostavljajući neovisnost između eksplanatornih varijabli te izračunavajući distribuciju vjerojatnosti po klasama ishoda [10]. Pripada probabilističkim algoritmima strojnog učenja.
- *Algoritam stabla odluke (engl. Decision Tree)* - predstavnik algoritma koji logički i nadzirano uči. Strukturiran je kao stablo gdje svaki unutarnji čvor predstavlja pitanje koje razdvaja podatke, a čvorovi listovi predstavljaju odluke [11]. Pripada nelinearnim klasifikatorima.
- *Algoritam slučajnih stabala (engl. Random Forest)* - također jedan od nelinearnih klasifikatora. Koristi tehniku ansambla učenja gdje se stvara više stabala odlučivanja, što često dovodi do boljih rezultata u usporedbi s pojedinačnim stablima odlučivanja [12].
- *Višeslojni perceptron (engl. Multilayer perceptron)* - je najpoznatiji i najčešće korišten oblik neuronske mreže, nelinearni klasifikator. U većini slučajeva, signali se prenose unutar mreže samo u jednom smjeru - od ulaza prema izlazu. Nema povratnih petlji, što znači da izlaz svakog neurona ne utječe na sam neuron. Ova arhitektura se naziva prosljeđivanje unaprijed (eng. feedforward) [13].
- *Logistička regresija (engl. Logistic Regression)* - jedan od najčešće korištenih linearnih klasifikatora. Riječ je o algoritmu koji pretpostavlja linearnu vezu između objašnjavajućih varijabli i klasa rezultata. Ovaj algoritam odabire prag za granicu odlučivanja [14].
- *Linearna analiza diskriminanti (engl. Linear Discriminant Analysis)* - koristi linearnu kombinaciju značajki ili objašnjavajućih varijabli kako bi podatke razvrstao u različite klase [15].
- *Metode potpornih vektora (engl. Support Vector Machines (SVM))* – temelji se na principima statističke teorije učenja i konveksne optimizacije [16]. SVM ima svrhu smanjivanja gornje granice generalizacijske pogreške tako što maksimizira razmak između odvajajuće hiperplohe i podataka [17].

Za svaki od spomenutih klasifikatora korištena je Python biblioteka scikit-learn.

### **3. Rezultati**

Nakon implementacije iznad opisanih algoritama, treniranja i testiranja podataka, koristili smo evaluacijske mjere koje se najčešće koriste kod klasifikacije. Konkretno, korištene su metrike *Precision, Recall, F-score, Balanced Accuracy, Accuracy*. Rezultat su prikazani u Tablici 1.

**Tablica 1.** Rezultati korištenih klasifikacijskih algoritama

Algoritam	Precision	Recall	F-score	Balanced accuracy	Accuracy
<i>Naivni Bayesov klasifikator</i>	0.03434	0.75023	0.06568	0.71496	0.68075
<i>Stablo odlučivanja</i>	0.22842	0.26141	0.24380	0.62400	0.97574
<i>Algoritam slučajnih stabala</i>	0.801169	0.06383	0.11825	0.53179	0.98575
<i>Logistička regresija</i>	0.17372	0.01910	0.03442	0.508862	0.98396
<i>Linearna analiza diskriminanti</i>	0.27995	0.38863	0.32546	0.68672	0.97590
<i>Višeslojni perceptron</i>	0.57142	0.17707	0.27036	0.58752	0.98570
<i>Metode potpornih vektora</i>	0.10344	0.00279	0.00544	0.50121	0.98472

#### 4. Diskusija

Ako pogledamo rezultate evaluacijskih mjera, primjećujemo veliku razliku između vrijednosti točnosti (engl. *accuracy*) i balansirane točnosti (engl. *balanced accuracy*). Iako različite mjere izdvajaju različite algoritme, uzimajući u obzir balansiranu točnost, Naivni Bayesov algoritam dao je najbolje rezultate za detekciju cesta na satelitskim snimkama. To ne znači nužno da ostali algoritmi lošije rade, nego samo da je u ovakvom konkretnom slučaju dobro koristiti Naivni Bayesov algoritam. Važno je napomenuti da učinkovitost algoritama strojnog učenja može varirati ovisno o mnogim faktorima, uključujući skup podataka, odabir značajki, parametre modela i ostale čimbenike. Stoga, najbolji algoritam za određenu zadaću može se razlikovati ovisno o kontekstu i specifičnim uvjetima istraživanja. U budućem radu istražiti će se složeniji algoritmi koji osim značajki jednog piksela uzimaju u obzir i stanje okolnih piksela i kontekst s ciljem postizanja bolje preciznosti. Također, ispitat će se tehnike balansiranja skupa podataka jer su mjere pokazale da nebalansiranost između podataka o cestama i ostalih podataka pravi velik problem algoritmima.

## Literatura

- [1] Campbell, J. B., Wynne, R. H.: Introduction to remote sensing, pp. 31 – 55, 285 – 286, 339–356, 2011, doi: 10.3390/rs5010282
- [2] Mather, P., Tso B. : Classification Methods for Remotely Sensed Data (2nd ed.), CRC Press, 2016, doi: 10.1201/9781420090741
- [3] Maxwell, Aaron E., Timothy A. Warner, Fang F. : Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review, International journal of remote sensing , pp. 2784 - 2817, 2018, doi: 10.1080/01431161.2018.1433343
- [4] SD Županija-Regionalne karakteristike Splitsko-dalmatinske županije, www.dalmacija.hr/zupanija/informacije, 21.02.2022.
- [5] SD Ceste-Županijska uprava za ceste Split, www.zuc-split.hr, 10.07.2023.
- [6] Ivanda, A. : Primjena strojnog učenja u promatranju Zemlje daljinskim istraživanjima, Kvalifikacijski ispit, 2022, www.fesb.unist.hr/wp-content/uploads/2022/06/A.Ivanda-Kvalifikacijski-rad.pdf
- [7] Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V.R., Murayama, Y., Ranagalage, M.: Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review, Remote Sens, pp. 2291, 2020, doi: 10.3390/rs12142291
- [8] Zhang, Yingjia, et al. : Density and diversity of OpenStreetMap road networks in China, Journal of Urban Management pp. 135 - 146, 2015, doi: 10.1016/j.jum.2015.10.001
- [9] Kumar, R., Rajesh V.: Classification algorithms for data mining: A survey. International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET), pp.7-14, 2012
- [10] Singh, A., N. Halgamuge, M, Lakshmganthan R. : Impact of different data types on classifier performance of random forest, naive bayes, and k-nearest neighbors algorithms, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2017, doi: 10.14569/ijacsa.2017.081201
- [11] Priyam, Anuja, et al. : Comparative analysis of decision tree classification algorithms International Journal of current engineering and technology, pp. 334 - 337, 2013
- [12] Breiman, L.: Random forests, Machine learning 45, pp. 5-32,2001
- [13] Popescu, M-C., et al. : Multilayer perceptron and neural networks, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, pp. 579 - 588, 2009
- [14] Tolles, J., Meurer, W.J. : Logistic regression: relating patient characteristics to outcomes., Jama, pp. 533-534, 2016, doi: 10.1001/jama.2016.7653
- [15] Izenman, A.J. : Linear discriminant analysis, Modern multivariate statistical techniques: regression, classification, and manifold learning, Springer - New York, New York, pp. 237-280, 2013, doi: 10.1007/978-0-387-78189-1\_8
- [16] Mammone, A., Turchi, M., Cristianini, N. : Support vector machines, Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, pp. 283-289, 2009, doi: 10.1002/wics.49
- [17] Amari, S., Wu S. : Improving support vector machine classifiers by modifying kernel functions, Neural Networks, pp. 783 - 789, 1999, doi:10.1016/s0893-6080(99)00032-5



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.08>

## PROJEKTIRANJE AUTOCESTA PRILAGOĐENIH PROMETU AUTONOMNIH VOZILA

**Ana Čudina Ivančev<sup>1</sup>, Vesna Dragčević<sup>1</sup>, Tamara Džambas<sup>1</sup>**

(1) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Hrvatska, [ana.cudina.ivancev@grad.unizg.hr](mailto:ana.cudina.ivancev@grad.unizg.hr),  
[vesna.dragcevic@grad.unizg.hr](mailto:vesna.dragcevic@grad.unizg.hr), [tamara.dzambas@grad.unizg.hr](mailto:tamara.dzambas@grad.unizg.hr)

### Sažetak

U posljednjih nekoliko godina sve je veći broj istraživanja koja se bave razvojem autonomnih vozila. Sposobnost autonomnih vozila da samostalno upravljaju, predviđaju situacije, komuniciraju s okolnim vozilima i infrastrukturom te sredinom u kojoj se nalaze, postavlja nove zahtjeve za projektiranje cestovne infrastrukture. Postupna prilagodba cestovne infrastrukture u najvećoj će mjeri ovisiti o stupnju razvoja autonomnih vozila i njihovom udjelu u prometnom toku. U ovom su radu prikazani rezultati postojećih istraživanja vezanih uz geometrijsko oblikovanje autocesta prilagođenih prometu autonomnih vozila te su dane smjernice za provedbu daljnjih istraživanja čiji će cilj biti detaljna analiza svih projektnih elemenata prilikom izgradnje novih ili rekonstrukcije postojećih autocesta, a ovisno o udjelu autonomnih vozila u prometnom toku.

*Ključne riječi: autonomna vozila, projektiranje, autocesta, smjernice*

## DESIGNING HIGHWAYS FOR THE TRAFFIC OF AUTONOMOUS VEHICLES

### Abstract

In the last few years, there has been an increasing amount of research dealing with the development of autonomous vehicles. The ability of autonomous vehicles to drive themselves, predict situations, communicate with surrounding vehicles and infrastructure, and interact with the environment in which they are located sets new requirements for designing road infrastructure. Gradual adaptation of the road infrastructure will largely depend on the level of development of autonomous vehicles and their share in the traffic flow. This paper presents the results of existing research related to the geometric design of highways adapted to the traffic of autonomous vehicles and provides guidelines for the implementation of further research. The main purpose of the research will be a detailed analysis of all project elements during the construction of new or reconstruction of existing highways, depending on the share of autonomous vehicles in traffic flow.

*Keywords: autonomous vehicles, design, highway, guidelines*

## 1. Uvod

U današnje vrijeme autonomna vozila privlače puno pozornosti u znanosti i industriji diljem svijeta, a njihov sve brži razvoj najavljuje i značajnu potrebu za prilagodbom prometne infrastrukture [1]. Brojne europske zemlje financiraju istraživačke projekte te postavljaju ciljeve i strateške planove za autonomnu mobilnost [2], dok znanstvena istraživanja sugeriraju uspostavljanje standarada i smjernica za projektiranje, odnosno prilagodbu cestovne infrastrukture novim prometnim trendovima [3]. Predviđaju se tri faze uvođenja autonomnih vozila u prometni sustav (Tablica 1.), a prilagodba cestovne infrastrukture ovisit će o razini njihove autonomije te udjelu takvih vozila u prometnom toku. U prvoj fazi prilagodbe radi se na intenzivnom održavanju prometnica i popratnih sadržaja, dok se u sljedećim fazama planira izdvajanje zasebnih koridora za autonomna vozila te, u konačnici, pojednostavljenje, odnosno prilagodba cestovne infrastrukture prometu takvih vozila [4].

**Tablica 2.** Udio autonomnih vozila [4]

Faza	Vrijeme uvođenja	Udio autonomnih vozila	Prilagodba infrastrukture
1	sada	< 20 %	intenzivno održavanje
2	2030-e	20 – 50 %	izdvojeni koridori
3	2050-e	> 50 %	nova infrastruktura

Razvoj i prilagodba cestovne infrastrukture prvenstveno će ovisiti o razvoju autonomnih vozila. Udruženje automobilskih inženjera (SAE) klasificiralo je autonomna vozila po razinama autonomije od L0 do L5 [4], gdje razina L0 podrazumijeva konvencionalno vozilo bez autonomije, a razina L5 potpuno autonomno vozilo [5] (Tablica 2).

**Tablica 3.** SAE klasifikacija autonomije [4]

Razina autonomije	Naziv razine	Zadatak vožnje		Odziv na neuspjeh	Operativno područje
		Bočna i uzdužna kontrola	Nadgledanje okoline		
Vozač obavlja dio ili cijeli zadatak vožnje					
0	bez autonomije	vozač	vozač	vozač	nije primjenjivo
1	vozačevo sudjelovanje	vozač i sustav	vozač	vozač	ograničeno
2	djelomična autonomnost	sustav	vozač	vozač	ograničeno
Sustav obavlja cijeli zadatak vožnje					

3	uvjetna autonomnost	sustav	sustav	vozač i sustav	ograničeno
4	visoka autonomnost	sustav	sustav	sustav	ograničeno
5	potpuna autonomnost	sustav	sustav	sustav	neograničeno

Očekuje se da će prva autonomna vozila najprije voziti po autocestama, a tek potom u urbanim sredinama i to u periodu između 2030. i 2050. godine [6]. Istraživanje [7] fokusirano na utvrđivanje naprednih funkcija autonomnih vozila pokazalo je da veliki uzdužni nagibi i kratke horizontalne krivine mogu uzrokovati pogreške u sustavu te da je na autocestama vožnja takvim vozilima najsigurnija s obzirom na njezine geometrijske karakteristike.

## 2. Utjecaj autonomnih vozila na projektiranje autocesta

Prilikom projektiranja cestovne infrastrukture potrebno je odrediti mjerodavno vozilo. Autonomna vozila sadrže različite vrste senzora te napredne sustave za podršku vozaču pri upravljanju vozilom, dok se njihove dimenzije ne razlikuju od dimenzija konvencionalnih vozila [8]. Uz navedeno, istraživanja [9, 10] su pokazala da će se u budućnosti u najvećoj mjeri promijeniti oni parametri za projektiranje cestovne infrastrukture koji su direktno vezani uz karakteristike vozača (npr. vrijeme reakcije, visina oka vozača i sl.).

U prethodnom istraživanju [11] provedenom od strane autora ovog rada, analiziran je utjecaj autonomnih vozila na odabir projektnih elemenata javnih cesta izvan naselja definiranih hrvatskim Pravilnikom [12]. Vrijeme reakcije je parametar koji utječe na duljinu zaustavne preglednosti. S obzirom da autonomna vozila sadrže senzore čije je vrijeme prepoznavanja prepreke na cesti (0,2 – 0,5 s) značajno manje od vremena reakcije vozača (1 – 2 s), zaključeno je da bi se duljine zaustavne preglednosti na autocestama mogle smanjiti od 21 do 33 %, ovisno o računskoj brzini. Uslijed manje duljine zaustavne preglednosti te činjenice da se prethodno navedeni senzori nalaze na krovu vozila na visini od oko 1,85 m iznad tla, a visina oka vozača iznosi 1,0 m, vrijednosti minimalnih polumjera konveksnih vertikalnih krivina smanjile bi se od 67 do 72 %. Nadalje, s obzirom da takvim vozilom neće upravljati vozač, zaključeno je da će promet autonomnih vozila utjecati i na uvjet za primjenu pravca pri trasiranju (zamor vozača, zaslepljivanje svjetlima vozila iz suprotnog smjera). Predviđaju se i promjene u poprečnom presjeku ceste, odnosno moguća suženja prometnih trakova od 65 do 75 cm, do kojih bi moglo doći uslijed korištenja sustava zadržavanja vozila u prometnom traku i, posljedično, smanjenja zaštitnih bočnih širina uz vozilo. U jednom istraživanju provedenom u Velikoj Britaniji [13] autori su prezentirali nove optimizirane poprečne presjeke na autocesti nestandardnih dimenzija. Radilo se o autocesti s postojećim tri prometna traka i zaustavnim trakom te je predloženo pet optimiziranih poprečnih presjeka kojima su varirane širine (2,5 – 5,0 m) i broj prometnih trakova (3 ili 4), pri čemu je uvijek vanjski prometni trak uz zaustavni trak bio rezerviran isključivo za promet autonomnih teretnih vozila. Zaključno, prema svemu navedenom pokazalo se da će prethodno opisana projektna pravila u slučaju prometa



autonomnih vozila biti „blaža“. Svakako, treba napomenuti i da će se nova prometna infrastruktura prema takvim projektnim pravilima moći projektirati tek kada na cestama budu prometovala isključivo autonomna vozila, odnosno kada u prometnom toku više ne bude konvencionalnih vozila [14].

U drugom istraživanju [15] provedenom od strane autora ovog rada, analiziran je utjecaj autonomnih vozila na duljinu trakova za usporenje na autocestama prema njemačkim smjernicama [16] i švicarskoj normi [17]. Naime, vozila razine autonomije L3 još uvijek se oslanjaju na vozača i na eventualno preuzimanje kontrole prilikom neprepoznavanja okoliša ili nekih nepredviđenih situacija, kao što je primjerice pojava traka za usporenje na autocesti. Predmetno istraživanje je pokazalo da bi se zbog duljeg vremena reakcije za početak radnje usporavanja (5 ili 8 s) duljine trakova za usporenje trebale povećati i za više od dvostruko. Takva promjena u projektiranju može se uvesti i u ranijim fazama uvođenja autonomnih vozila u promet, s obzirom da ista ne utječe na sigurnost prometovanja konvencionalnih vozila. Druga istraživanja su pokazala [18] da će na duljinu traka za usporenje utjecati i vrijednost srednjeg usporenja s obzirom da se pretpostavlja da će autonomna vozila kočiti kontinuirano te da će usporenje trajati dulje [17]. Iz navedenog proizlazi da će vrijednost akceleracije biti manja, a samim time duljina traka za usporenje još veća.

### 3. Diskusija i zaključak

Optimalno geometrijsko oblikovanje autoceste ovisno je o tome projektira li se nova infrastruktura ili se provodi rekonstrukcija postojeće te je dodatno uvjetovano udjelom autonomnih vozila u cjelokupnom prometnom sustavu. Za optimalno oblikovanje bilo kojeg projektnog elementa, odnosno prilagodbe cestovne infrastrukture autonomnim vozilima, nužna je detaljna analiza i sagledavanje svih utjecajnih parametara. U Tablici 3. prikazani su projektni elementi autoceste koji bi se s povećanjem udjela autonomnih vozila u prometnom sustavu mogli mijenjati ovisno o tome projektira li se nova infrastruktura ili se provodi rekonstrukcija postojeće.

**Tablica 4.** Analiza projektnih elemenata autoceste s obzirom na udio autonomnih vozila [15]

Udio autonomnih vozila	Cestovna infrastruktura	Projektni elementi autoceste				
		Tlocrtni elementi	Uzdužni presjek	Poprečni presjek	Čvorišta	Trak za usporenje
0%	nova	-	-	-	-	-
	rekonstrukcija	-	-	-	-	-
50%	nova	-	-	-	-	+
	rekonstrukcija	-	-	+/-	+/-	+
100%	nova	+	+	+	+	+
	rekonstrukcija	+/-	+/-	+	+/-	+

Legenda: - ne mijenja se; + mijenja se, +/- razmotriti

Pri rekonstrukciji postojeće infrastrukture treba dodatno razmotriti i financijski učinak u odnosu na ekonomičnost korištenja prostora, propusnu moć i sigurnost prometa.

S obzirom na sve navedeno, u daljnjim istraživanjima će se detaljnije analizirati geometrijsko oblikovanje svakog pojedinog projektnog elementa prilikom izgradnje novih ili rekonstrukcije postojećih autocesta, a ovisno o udjelu autonomnih vozila u prometnom toku (50 % ili 100 %) (Tablica 3.) U konačnici, provedena istraživanja rezultirat će izradom smjernica za projektiranje autocesta prilagođenih prometu autonomnih vozila.

## Literatura

- [1] Tengilmoglu, O., Carsten, O., Wadud, Z.: Implications of automated vehicles for physical road environment: A comprehensive review, *Transportation Research Part E*, 169, 2022, doi: 10.1016/j.tre.2022.102989
- [2] Gavanas N.: Autonomous Road Vehicles: Challenges for Urban Planning in European Cities, *Urban Science*, 3, 61, 2019, doi: 10.3390/urbansci3020061
- [3] Rana, M., Hossain, K.: Connected and Autonomous Vehicles and Infrastructures: A Literature Review, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2021, doi: 10.1007/s42947-021-00130-1
- [4] Liu, Y., et al: A Systematic review: Road infrastructure requirement for Connected and Autonomous Vehicles (CAVs), *Journal of Physics: Conference Series* 1187 042073, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1187/4/042073
- [5] SAE International, <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>, 14.6.2023.
- [6] Fayyaz, M., González- González, E., Nogués, S.: Autonomous Mobility: A Potential Opportunity to Reclaim Public Spaces for People, *Sustainability*, 14, 1568, 2022, doi: 10.3390/su14031568
- [7] Tak, S., Kim, S., Yu, H., Lee D.: Analysis of Relationship between Road Geometry and Automated Driving Safety for Automated Vehicle-Based Mobility Service, *Sustainability*, 14, 2336, 2022, doi: 10.3390/su14042336
- [8] Wang., S., Yu, B., Ma, Y., Liu, J., Zhou, W.: Impacts of Different Driving Automation Levels on Highway Geometric Design from the Perspective of Trucks, *Hindawi, Journal of Advanced Transportation*, Volume 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/5541878
- [9] Aryal, P.: Optimization of geometric road design for autonomous vehicle, Degree project, 2020., KTH Royal Institute of technology, Stockholm, Sweden
- [10] Othman, K.: Impact of Autonomous Vehicles on the Physical Infrastructure: Changes and Challenges, *Designs*, 5,40, 2021, doi: 10.3390/designs5030040
- [11] Čudina Ivančev, A., Dragčević, V., Džambas, T.: Road infrastructure requirements to accommodate autonomous vehicles, *CETRA 2022, 7th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, Pula, pp. 175 - 181, 2022, doi:10.5592/CO/CETRA.2022.1462
- [12] Pravilnik o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa (NN 110/01, 90/22)
- [13] Jehanfo, H., Hu, S., Kaparias, I., Preston, J., Zhou, F., Stevens, A.: Redesigning Highway Infrastructure Systems for Connected Autonomous Truck Lanes, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 148(12), 2022.

- [14] Guerrieri, M., Mauro, R., Pompigna, A., Isaenko, N.: Road Design Criteria and Capacity Estimation Based on Autonomous Vehicle Performances. First Results from the European C-Roads Platform and A22 Motorway, *Transport and Telecommunication*, 22, 2, pp. 230 - 243, 2021, doi: 10.2478/ttj-2021-0018
- [15] Čudina Ivančev, A., Dragčević, V.: Utjecaj autonomnih vozila na odabir projektnih elemenata autocesta, 8. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Zagreb, pp. 235 - 245 , 2022, doi: 10.5592/CO/PhDSym.2022.19
- [16] Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), FGSV, 2008.
- [17] Knoten, Kreuzungsfreie Knoten, SN 640 261, Schweizer Norm, 1998.
- [18] Chen, C., Lin, Z., Zhang, S., Chen, F., Chen, P., Zhang L.: The Compability between the Takeover Process in Conditional Automated Driving and the Current Geometric Design of the Deceleration Lane in Highway, *Sustainability*, 13, 13403, 2021, doi: 10.3390/su132313403.



## UTJECAJ TEMPERATURE I TRAJANJA OPTEREĆENJA NA PONAŠANJE GREDA OD LAMINIRANOG STAKLA

Gabrijela Grozdanić<sup>1,2</sup>, Mirela Galić<sup>1</sup>

(1) *Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, Hrvatska*

(2) *Université de Technologie de Compiègne/Sorbonne Universités, Compiègne, Francuska*  
*gabrijela.grozdanic@gradst.hr; mirela.galic@gradst.hr*

### Sažetak

U ovom radu prikazane su neke od osnovnih karakteristika laminiranog stakla te različiti pristupi proračunu nosača izrađenih od laminiranog stakla. Prvo je detaljno opisan mehanizam ponašanja laminiranih staklenih elemenata u fazama prije loma, potom za vrijeme loma te naposljetku nakon loma staklenih elemenata. Opisan je utjecaj svakog materijala na pojedinu fazu te njegove specifičnosti vezane uz vrstu opterećenja i druge vanjske utjecaje. Opisani su pristupi proračunu koji preporučuju norme, kao i njihove prednosti te nedostaci. Daljnji fokus rada je na elementima koji su opterećeni okomito na ravninu spajanja panela te je analiziran statički sustav sukladno normi EN 1288-3 [1] koja opisuje postupak testiranja staklenih elemenata na statičko opterećenje savijanjem u četiri točke (*four-point bending*). U analizi nosači su izloženi različitim trajanjima opterećenja, kao i različitim atmosferskim temperaturama. Rezultati potvrđuju značajan utjecaj temperature i trajanja opterećenja na nosivost staklenih laminiranih nosača.

*Ključne riječi: laminirano staklo, savijanje u četiri točke, utjecaj temperature*

### THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND LOAD DURATION ON THE BEHAVIOR OF LAMINATED GLASS BEAMS

### Abstract

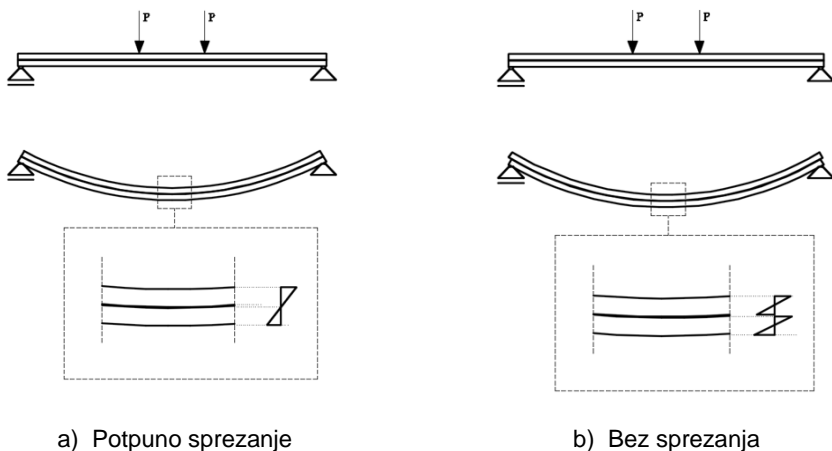
This paper presents some of the basic characteristics of laminated glass and different approaches to the design of elements made of laminated glass. First, the behavior mechanism of laminated glass elements is described in detail for the stages before breakage, during breakage, and after breakage. Also, the influence of each of the materials on a particular phase is described, as well as their peculiarities related to the type of load and other external influences. Different design approaches recommended by the regulations are described, as well as their advantages and disadvantages. Further on, the focus of the work is on the elements that are loaded perpendicular to the panel plane, and static systems are analyzed in accordance with the EN 1288-3 [1] standard, which describes the procedure for testing glass elements for static loading by four-point bending. In the analysis, the elements are exposed to different load durations as well as different atmospheric temperatures. The results of the analysis confirm the significant influence of temperature and load duration on the load capacity of glass laminated elements.

*Keywords: laminated glass, four-point bending, temperature effect*

## 1. Uvod

Laminirano staklo je kompozit nastao spajanjem dvaju ili više staklenih panela s polimernim međuslojevima koji osiguravaju cjelovitost elementa i prijenos posmičnih napreznja na kontaktnim plohamama. Budući da je staklo izrazito krta materijal, i samim tim nepredvidiv u pogledu gubitka nosivosti, može se reći da je laminirano staklo jedan oblik intervencije u staklenim konstrukcijama kojim se osigurava dodatni kapacitet nosivosti nakon što nastupi lom jednog ili više panela. Ako promatramo samo staklene panele, oni se ponašaju linearno sve do trenutka loma, a napreznje pri lomu ovisi o vrsti stakla koja se koristi. Modul elastičnosti stakla iznosi približno 70 GPa i ne ovisi o vrsti stakla [2]. Staklo ne pokazuje značajne promjene mehaničkih svojstava za prosječne atmosferske utjecaje dok su polimeri koji se koriste u proizvodnji laminiranog stakla izrazito osjetljivi na vanjske utjecaje i na vrstu opterećenja.

U proizvodnji laminiranog stakla najprisutniji međuslojevi su PVB (*polyvinyl butyral*), EVA (*ethylvinyl acetate*) i međuslojevi na bazi lonoplasta. Međusloj dolazi u različitim debljinama, ovisno o vrsti materijala i zahtjevima, a najčešće je to u rasponu 0,36 mm – 2,28 mm. Za razliku od stakla, međuslojevi pokazuju značajna odstupanja u mehaničkim karakteristikama pri različitim temperaturama [3][4], brzini nanošenja opterećenja [5][6][7], trajanju opterećenja [8][9][10] i vlažnosti [11][7]. U literaturi se mogu pronaći testovi na uzorcima međuslojeva koji su samostalni ili koji su ugrađeni unutar dva panela. Budući da međuslojevi prolaze različite procese pri spajanju staklenih panela (kao *autoclave* proces) koji mogu utjecati na mehaničke karakteristike istih, preporuča se testiranje uzoraka koji su prethodno izloženi svim utjecajima ili validiranje testa na uzorcima laminiranog stakla u stvarnoj veličini [12].

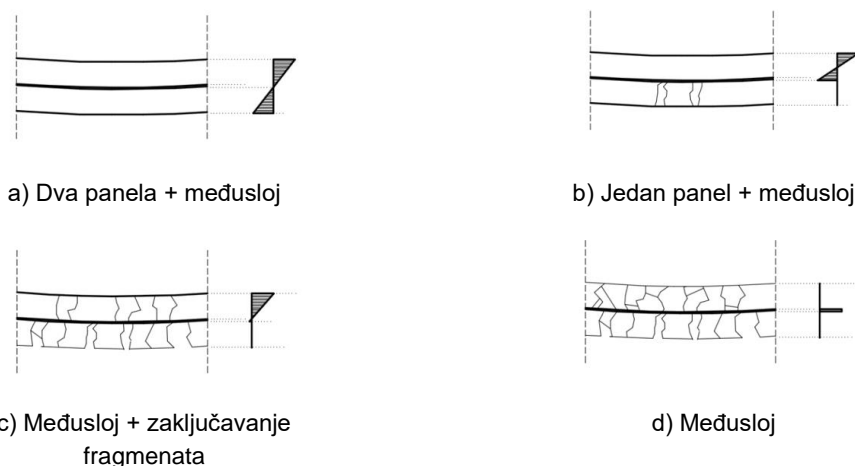


Slika 1. Prikaz raspodjele napreznja na laminiranom nosaču za dva krajnja slučaja ponašanja međusloja – potpuno spreznanje i bez spreznanja [13]

### 1.1. Laminirani stakleni elementi izloženi opterećenju izvan ravnine

Ako promatramo staklenu laminiranu gredu opterećenu na savijanje (Slika 1.) možemo primijetiti da aksijalne deformacije međusloja nisu značajne jer se međusloj nalazi u sredini

(ili približno u sredini) panela. Sve do trenutka loma jednog staklenog panela međusloj je dominantno izložen posmičnom naprezanju, tj. posmičnoj deformaciji [9]. Ovisno o mehaničkim karakteristikama međusloja, u literaturi se koriste dva limita u ponašanju laminiranih staklenih nosača koja su definirani preko modula posmika  $G$  te prikazani na Slici 1: a) potpuno sprezanje ( $G \rightarrow \infty$ ) te b) bez sprezanja ( $G \rightarrow 0$ ). Budući da se pri malim deformacijama i kraćim opterećenjima međuslojevi ponašaju uglavnom linearno [14], viskoznost međusloja ne dolazi do izražaja. Slika 2. prikazuje raspodjelu naprezanja u različitim fazama oštećenja nosača koje su karakteristične za savojno opterećenje. Za dvoslojni laminirani nosač bez oštećenja i međusloj koji ostvaruje sprezanje, raspodjela normalnih naprezanja je linearna (Slika 2. a)). U trenutku loma međusloj preuzima vlačna naprezanja (b) te dolazi do većih deformacija koje aktiviraju nelinearno ponašanje međusloja (ponekad opisano s hiperelastičnim modelima [14]). Kod loma svih panela međusloj preuzima cjelokupno opterećenje, uz eventualno povećanu krutost nastalu zaključavanjem staklenih fragmenata u tlačnoj zoni što ovisi o vrsti stakla (Slika 2. c) i d)). Tek u tim posljednjim fazama pred potpuni lom elementa međusloj je izložen većim deformacijama pri kojima polimerni materijali ulaze u nelinearna viskoplastična ili viskoelastična područja. Nakon što svi stakleni slojevi izgube sposobnost prenošenja opterećenja, nosivost laminiranih staklenih elemenata ovisi o mehaničkom ponašanju međusloja te prijanjanju međusloja i fragmenata stakla. U ovoj fazi potrebna je detaljna simulacija ponašanja međusloja uz odgovarajuću simulaciju prijanjanja međusloja i fragmenata stakla. Istraživanje koje se bavi kapacitetom nosivosti laminiranog stakla nakon loma može se pronaći u [15][16] za opterećenje u ravnini, te u [17][18] opterećenje izvan ravnine (savijanje).



**Slika 2.** Prikaz faza loma i preraspodjele naprezanja kod laminiranog staklenog nosača opterećenog izvan ravnine [13]

Kod dimenzioniranja svakodnevnih objekata u proračunu elemenata izrađenih od laminiranog stakla ne želimo se dovesti u fazu u kojoj je nastupio lom jednog ili više panela, već dimenzioniramo elemente tako da ostanu cjeloviti pri najvećem očekivanom opterećenju. Smjernice za projektiranje i norme [19][20][21][22] predlažu nekoliko pristupa, od kojih se

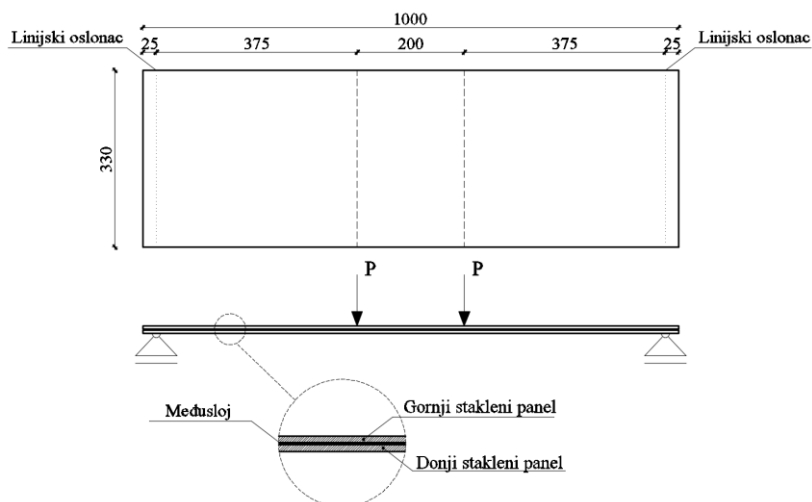
najviše ističe proračun metodom efektivne debljine [23] koji je (uz manje razlike) opisan unutar svake norme. Osim pojednostavljenog proračuna metodom efektivne debljine predlaže se i korištenje detaljnog numeričkog modela koji uzima u obzir sve efekte koji utječu na nosivost laminiranog stakla.

Koristeći upravo detaljni numerički model, analizirat ćemo ponašanje laminiranih staklenih elemenata u fazi prije loma staklenih panela i to za različite temperature i različita trajanja opterećenja.

## 2. Numerička analiza ponašanja laminiranih staklenih elemenata

### 2.1. Opis modela

Da bismo analizirali utjecaj temperature i trajanja opterećenja na nosivost laminiranih staklenih nosača, izrađen je numerički model u računalnom programu ANSYS. Dimenzije promatranog elementa su 1000 mm x 330 mm i sastavljen je od dva staklena panela debljine 8 mm s tri različite debljine međuslojeva: 0,76mm (0,89mm), 1,52mm i 2,28mm (PVB i Ionoplast). Staklo je modelirano kao linearno elastičan materijal s modulom elastičnosti  $E=70\text{GPa}$ , dok su za međusloj usvojene karakteristike preuzete od komercijalnih proizvođača [24][25]. Modul posmika međusloja usvojen je ovisno o trajanju opterećenja i promatranj temperaturi. Raspon promatranih temperatura je u okviru atmosferskih vrijednost 0 – 50 °C, dok je trajanje opterećenja usvojeno kao 1 min, 24 sata te 1 mjesec.

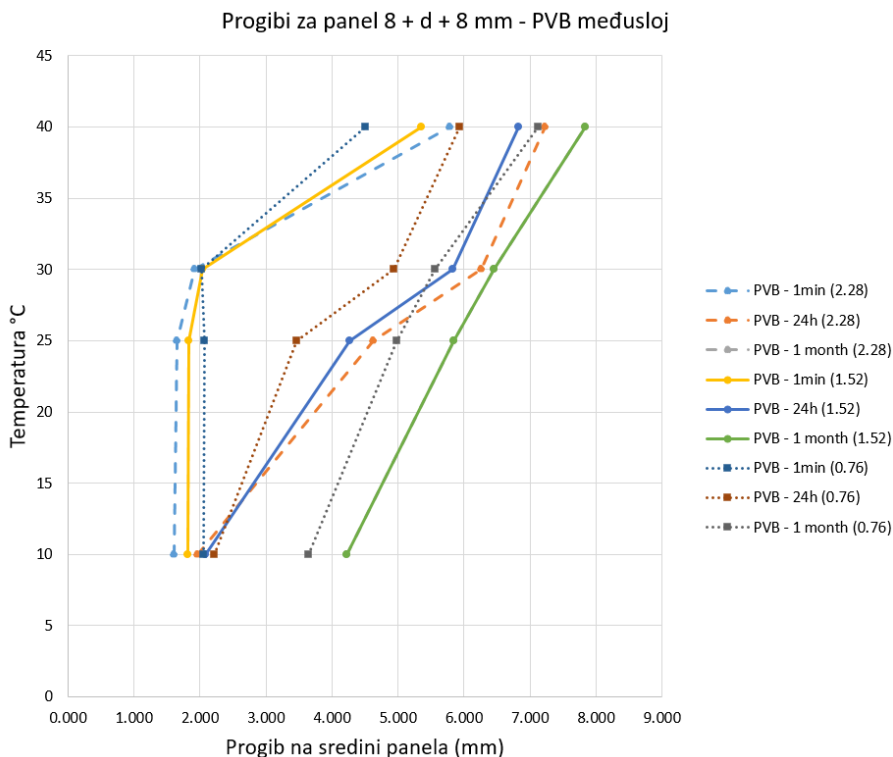


**Slika 3.** Prikaz statičkog sustava, opterećenja i oblika poprečnog presjeka korištenog u numeričkoj analizi [26]

Promatrani su maksimalni progibi koji se razvijaju uslijed opterećenja savijanjem (simulacija testa savijanja u četiri točke). Veličina ukupne sile na elementu usvojena je kao konstantna i iznosi 1000 N te je zadana kao dva linearno raspodijeljena opterećenja na razmaku od 200 mm. Prikaz modela nalazi se na Slici 3.

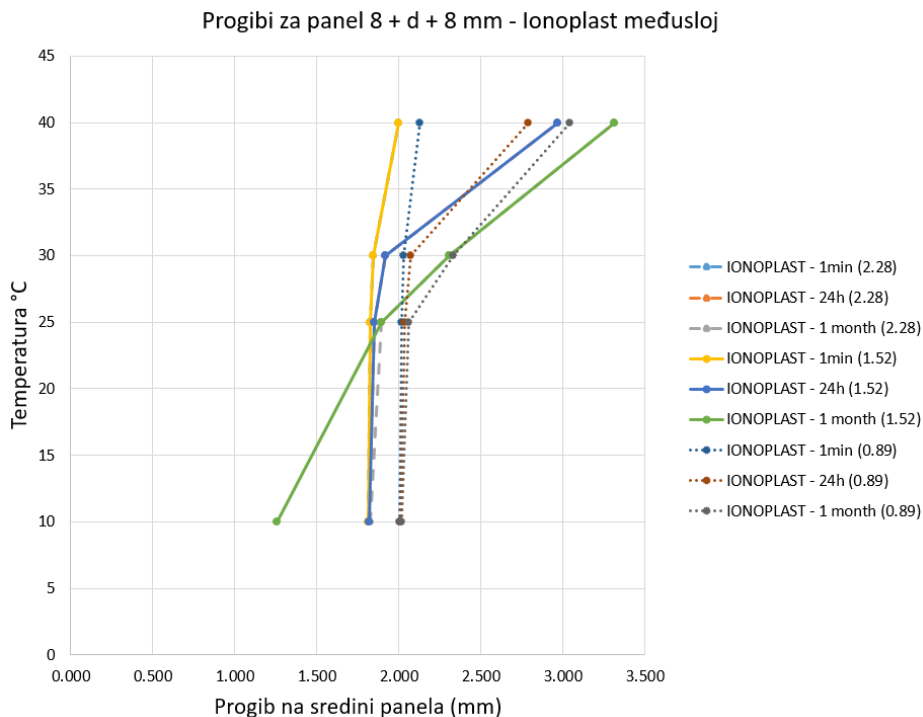
## 2.2. Rezultati

Proračun je proveden za konstantnu vrijednost sile uz varijaciju geometrije (d - debljine međusloja), temperature i trajanja opterećenja. Rezultati za dva različita međusloja prikazani su na grafovima (Slika 4. i Slika 5.) Iz rezultata je vidljivo da temperatura i trajanje opterećenja imaju značajan utjecaj na progibe elemenata koji imaju PVB međusloj. Povećanjem debljine međusloja dolazi do efekta omekšavanja elementa pri većim temperaturama i duljim trajanjima opterećenja. Za razliku od PVB međusloja, Ionoplast međusloj pokazuje značajno kruće ponašanje pri povišenim temperaturama i duljim trajanjima opterećenja. Iz grafova je vidljivo da povećanje debljine međusloja kod Ionoplasta doprinosi smanjenju progiba za temperature do 35°C, što nije slučaj kod PVB međusloja.



**Slika 4.** Prikaz progiba na sredini panela pri različitim temperaturama, trajanju opterećenja i debljini međusloja za element od laminiranog stakla s PVB međuslojem





**Slika 5.** Prikaz progiba na sredini panela pri različitim temperaturama, trajanju opterećenja i debljini međusloja za element od laminiranog stakla s Ionoplast međuslojem

### 3. Zaključak

U radu su analizirani dvoslojni laminirani stakleni nosači izloženi savojnom opterećenju sukladno normi EN 1288-3 [1] za koje ne dolazi do loma staklenih panela. Analiza je usmjerena primarno na ponašanje međuslojeva pa samim time i cijele konstrukcije, pri različitim temperaturama i trajanjima opterećenja. Međusloj je ključan element u laminiranim staklenim konstrukcijama jer se preko njega ostvaruje prijenos posmičnih sila među panelima. Taj prijenos se smanjuje s porastom temperature i trajanjem opterećenja što rezultira većim progibima i naprezanjima. U radu je prikazano ponašanje elemenata s dva različita tipa međusloja – PVB i Ionoplast te je iz rezultata vidljivo da temperatura i trajanje opterećenja imaju utjecaj na njihovo ponašanje.

## Literatura

- [1] CEN European Committee for Standardization, *EN 1288-3 - Glass in building — Determination of the bending strength of glass — Part 3: Test with specimen supported at two points (four point bending)*. 2016.
- [2] CEN European Committee for Standardization, *EN 16612 - Glass in building — Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation*. 2019.
- [3] T. Hána, M. Eliášová, K. Machalická, and M. Vokáč, "Determination of PVB interlayer's shear modulus and its effect on normal stress distribution in laminated glass panels," 2017, doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012076.
- [4] C. Louter, J. Belis, F. Veer, and J. P. Lebet, "Durability of SG-laminated reinforced glass beams: Effects of temperature, thermal cycling, humidity and load-duration," *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 280 – 292, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.046.
- [5] T. Hána, M. Vokáč, M. Eliášová, and K. V. Machalická, "Experimental investigation of temperature and loading rate effects on the initial shear stiffness of polymeric interlayers," *Engineering Structures*, vol. 223, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110728.
- [6] L. Andreozzi, S. Briccoli Bati, M. Fagone, G. Ranocchiani, and F. Zulli, "Dynamic torsion tests to characterize the thermo-viscoelastic properties of polymeric interlayers for laminated glass," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 1 – 13, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.003.
- [7] L. Biolzi, E. Cagnacci, M. Orlando, L. Piscitelli, and G. Rosati, "Long term response of glass-PVB double-lap joints," *Composites Part B: Engineering*, vol. 63, pp. 41 – 49, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.03.016.
- [8] R. Iwasaki, C. Sato, J. L. Latailladeand, and P. Viot, "Experimental study on the interface fracture toughness of PVB ( polyvinyl butyral )/ glass at high strain rates," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 12, pp. 293 – 298, 2013, doi: 10.1080/13588260701442249.
- [9] P. A. Hooper, B. R. K. Blackman, and J. P. Dear, "The mechanical behaviour of poly ( vinyl butyral ) at different strain magnitudes and strain rates," *Journal of Materials Science*, vol. 47, pp. 3564 – 3576, 2012.
- [10] X. Zhang, H. Hao, Y. Shi, and J. Cui, "The Mechanical Properties of Polyvinyl Butyral ( PVB ) at High Strain Rates," *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 404 – 415, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.057>.
- [11] X. Centelles, M. Martín, A. Solé, J. R. Castro, and L. F. Cabeza, "Tensile test on interlayer materials for laminated glass under diverse ageing conditions and strain rates," *Construction and Building Materials*, vol. 243, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118230.
- [12] M. L. Aenlle, A. Noriega, and F. Pelayo, "Mechanical characterization of polyvinil butyral from static and modal tests on laminated glass beams," *Composites Part B*, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.077.
- [13] G. Grozdanić, A. Ibrahimbegović, and M. Galić, "Different Approaches in Analyses and Modelling Laminated Glass Elements Exposed to Static Load," in *PROCEEDINGS 6 th International Conference on Computational Methods for Solids and Fluids*, 2023, pp. 90 – 92.
- [14] M. Schuster, M. Kraus, J. Schneider, and G. Siebert, "Investigations on the thermorheologically complex material behaviour of the laminated safety glass

- interlayer ethylene-vinyl-acetate,” *Glass Structures and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 373–388, 2018, doi: 10.1007/s40940-018-0074-9.
- [15] S. Muralidhar, A. Jagota, S. J. Bennison, and S. Saigal, “Mechanical behaviour in tension of cracked glass bridged by an elastomeric ligament,” *Acta Materialia*, vol. 48, no. 18 – 19, pp. 4577–4588, 2000, doi: 10.1016/S1359-6454(00)00244-5.
- [16] L. Galuppi and G. Royer-Carfagni, “A homogenized model for the post-breakage tensile behavior of laminated glass,” *Composite Structures*, vol. 154, pp. 600 – 615, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.052.
- [17] D. Baraldi, A. Cecchi, and P. Foraboschi, “Broken tempered laminated glass: Non-linear discrete element modeling,” *Composite Structures*, vol. 140, pp. 278 – 295, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.12.050.
- [18] L. Biolzi and M. Simoncelli, “Overall response of 2-ply laminated glass plates under out-of-plane loading,” *Engineering Structures*, vol. 256, no. October 2021, p. 113967, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.113967.
- [19] CEN European Committee for Standardization, *prEN 13474-3 - Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing*. 2009.
- [20] CEN European Committee for Standardization, *Guidance for European Structural Design of Glass Components*. 2014.
- [21] Buildings Department, “Code of Practice for Structural Use of Glass,” no. 1, 2018, [Online]. Available: <http://www.hfea.gov.uk/docs/CodeOfPracticeold.pdf%0Awww.tsoshop.co.uk>.
- [22] CEN European Committee for Standardization, *Design of glass structures - Part 2: Design of out-of-plane loaded glass components*. 2021.
- [23] L. Galuppi and G. F. Royer-Carfagni, “Effective thickness of laminated glass beams : New expression via a variational approach,” *Engineering Structures*, vol. 38, pp. 53 – 67, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.12.039.
- [24] AGC Glass Europe, “MATERIAL PROPERTIES OF PVB INTERLAYERS USED IN STRATOBEL AND STRATOBEL STRONG LAMINATED GLASS,” 2018.
- [25] Kuraray, “SentryGlas ® Ionoplast Interlayer-Elastic Properties (SG5000),” *Available online*: [https://www.trosifol.com/fileadmin/user\\_upload/technical\\_information/downloads/sentryglas/150129\\_Kuraray\\_TM\\_Datenblatt\\_SG.pdf](https://www.trosifol.com/fileadmin/user_upload/technical_information/downloads/sentryglas/150129_Kuraray_TM_Datenblatt_SG.pdf) (accessed on 29 January 2022).
- [26] M. Galić, G. Grozdanić, V. Divić, and P. Marović, “Parametric Analyses of the Influence of Temperature, Load Duration, and Interlayer Thickness on a Laminated Glass Structure Exposed to Out-of-Plane Loading,” *Crystals*, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst12060838>.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.11>

## POBOLJŠANJE PRAVILNIKA ZA PROJEKTIRANJE IZVANGRADESKIH CESTA S ASPEKTA SIGURNOSTI PROMETA

**Boris Čutura<sup>1</sup>, Ivan Lovrić<sup>2</sup>**

(1) *Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije, Sveučilište u Mostaru, Bosna i Hercegovina, boriscutura@gmail.com*

(2) *Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije, Sveučilište u Mostaru, Bosna i Hercegovina, ivan.lovrić40@gmail.com*

### Sažetak

Poboljšanje sigurnosti prometa na cestama, odnosno smanjenje broja nesreća, posebice onih s teškim posljedicama, jedna je od najznačajnijih aktivnosti u razvijenijim zemljama Europske unije. U članku se prvo opisuje sustav predloženih mjera provjere cestovne sigurnosti za područje jugoistočne Europe. Temeljem iskustva u provedbi revizija i inspekcija sigurnosti na autocestama i magistralnim cestama u Bosni i Hercegovini daju se preporuke za unaprjeđenje pojedinih odredbi postojećeg Pravilnika o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa. Posebno je istaknuta potreba točnijeg i detaljnijeg definiranja pojedinih elemenata geometrije u fazi projektiranja kako bi se u fazi eksploatacije izbjegle neophodne intervencije za poboljšanje sigurnosti.

*Ključne riječi: pravilnik, projektiranje, izvangradske ceste, sigurnost prometa*

## IMPROVEMENT OF GUIDELINES FOR THE DESIGN OF RURAL ROADS FROM ASPECTS OF TRAFFIC SAFETY

### Abstract

Improving road traffic safety, or reducing the number of accidents, especially those with serious consequences, is one of the most important activities in developed countries in the European Union. The article first describes the system of proposed road safety verification measures for Southeast Europe. Based on the experience gained in the implementation of safety audits and inspections on motorways and main roads in Bosnia and Herzegovina, recommendations for the improvement of certain stipulations of the existing Regulation on the basic conditions that public roads outside settlements and their elements must meet from the point of view of traffic safety are given. The need for a more accurate and detailed definition of elements of cross section and horizontal and vertical alignment in the design phase was particularly highlighted in order to avoid the necessary interventions to improve safety in the exploitation phase.

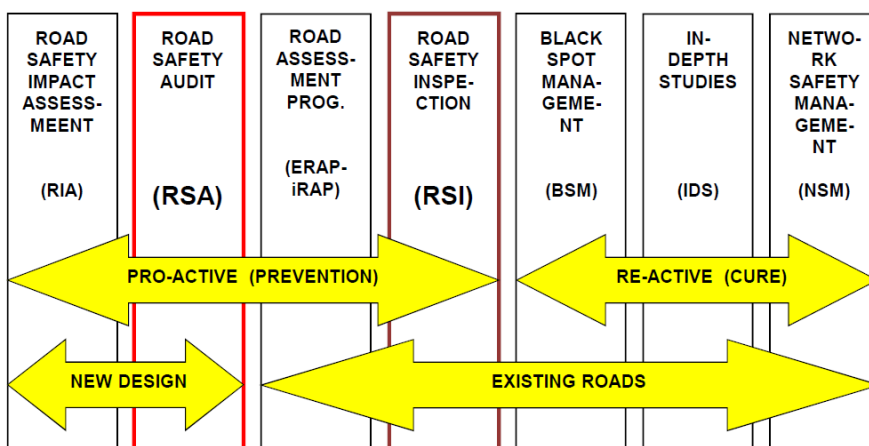
*Keywords: guidelines, road design, rural roads, traffic safety*

## 1. Uvod

Sigurnost prometa dugi je niz godina visoko na listi prioriteta u najrazvijenijim državama svijeta. Gubici uzrokovani prometnim nesrećama nenadoknadiivi su u svakom smislu pa tako i u ekonomskom. Prema mnogim pokazateljima samo se na prometnim nesrećama gubi od 2.5 – 5.0 % BDP-a na godišnjoj razini.

Odnos uloženihih finansijskih sredstava po pojedinim fazama od planiranja do same izgradnje novih prometnica minimalan je u odnosu na samu izgradnju, dok su koristi višestruke.

Stoga je i napravljen sustav provjere sigurnosti prometa, proaktivne i reaktivne faze, koje se provode na novim i postojećim cestama (slika 1).



Slika 1. SEETO priručnik za provjeru sigurnosti prometa [1]

Studija procjene rizika (RIA – Road Safety Impact Assessment), revizija sigurnosti (RSA – Road Safety Audit), program procjene rizika (iRAP – Road assessment Program) i kontrola cestovne sigurnosti (RSI – Road Safety Inspection) proaktivne su faze kojim se nastoji predvidjeti i ublažiti posljedice prometnih nesreća. Studija procjene rizika RIA i revizija RSA provode se na planskoj i projektnoj dokumentaciji, dok se ERAP i RSI provode na postojećim cestama.

Preostale faze studija crnih točaka (BSM – Black spot management), dubinske analize (IDS – In-depth studies) i upravljanje mrežom (NSM – Network safety management) reaktivne su faze i provode se na postojećim cestama.

Posebnu važnost imaju RIA i RSA jer se odnose na planiranje i projektiranje novih cesta. Vodeći se novim principima “samoobjašnjavajućih” (self-explaining) i “cestama koje opraštaju pogreške” (error-forgiving roads) izbjegavaju se potencijalne prometne nesreće i teške posljedice njih samih.

Za RSI i RSA uvedena je direktiva EU 2008/96/EC [2], a za RSI i dopuna direktive EU 2019/1936 [3].

Zbog loše i nepotpune postojeće regulative, rekonstrukcija postojećih i izgradnja novih cesta često se ne radi u skladu s principima sigurnosti prometa. Ovo se primarno odnosi na neuvažavanje realnih uvjeta odvijanja prometa kao što su nedovoljno tretiranje operativne brzine (mjerodavna računaska brzina) i ljudski faktor.

Ovaj problem regulative dodatno je izražen jer je RSA još uvijek neobvezna i rijetko se primjenjuje.

Planiranje i projektiranje sukladno sigurnosti prometa, iako podrazumijeva trenutni veći trošak, kasnije donosi ogromne benefite u eksploataciji novih cesta budući da će otkloniti nedostatke s aspekta sigurnosti prometa (RIA i RSA) koje neće biti potrebno naknadno otklanjati na već izgrađenim dionicama sa skupim dugoročnim mjerama iz RSI-a. Tako projektirane ceste pridonijet će i smanjenju prometnih nesreća s teškim posljedicama.

Na temelju iskustva provedenih revizija sigurnosti RSA i inspekcija sigurnosti RSI u Bosni i Hercegovini, mogu se donijeti generalni zaključci o konkretnim nedostacima pravilnika. U nastavku su dani prijedlozi za unaprjeđenje RH pravilnika za projektiranje cesta [4].

## **2. Prijedlog izmjene pravilnika za projektiranje**

Prema iskustvu u Bosni i Hercegovini gdje je provođen RSI na magistralnim cestama (u RH državne) i RSA na autocestama definirani su sigurnosni nedostaci koji se neprestano ponavljaju, a jednim dijelom rezultat su i nedovoljno dobrog pravilnika u BiH. Slični problemi se mogu vidjeti i u hrvatskoj mreži cesta kao rezultat pravilnika u RH. U nastavku su definirani najveći problemi i prijedlozi za izmjenu RH pravilnika.

### **2.1. Horizontalna geometrija**

#### **2.1.1. Duljina međupravca**

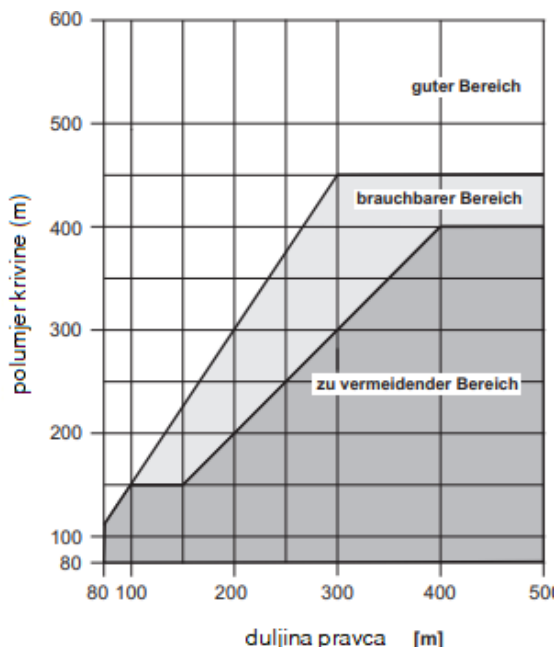
Usklađenost horizontalne geometrije najvažniji je faktor za sigurnost prometa jer definira ponajprije homogenost brzine. Pravac je kritični element koji tu homogenost u najvećoj mjeri definira. Pravilnikom je definirana duljina međupravca  $L_{pr}$  prema projektnoj brzini  $V_p$  [4]:

- $2 V_p \leq L_{pr} \leq 20 V_p$  – između suprotnih krivina
- $4 V_p \leq L_{pr} \leq 20 V_p$  – između istosmjernih krivina

Ovi rasponi ne definiraju dovoljno homogenost brzine pa niti uz dodatne uvjete u odnosu na polumjer krivine [4]:

- za  $L_{pr} \leq 500$  m,  $R \geq L_{pr}$
- za  $L_{pr} > 500$  m,  $R \geq 500$  m

Jedan od dobrih primjera striktnije primjene duljine međupravca možemo pronaći u njemačkom pravilniku za izvangradске ceste RAL [5] prikazanom na grafikonu sa slike 2. Grafikon daje precizniji odnos duljine međupravca i susjednog polumjera krivine što značajnije doprinosi homogenosti horizontalne geometrije i brzine.



Slika 2: Duljina pravca ovisno o polumjeru krivine na koju se veže [5]

### 2.1.2. Duljina kružnog luka

Određivanje duljine kružnog luka vrši se mjerenjem trajanja vožnje u kružnom luku za projektnu brzinu. Hrvatski pravilnik propisuje minimalnu duljinu kružnog luka za trajanje svega 1 s vožnje. Duljina kružnog luka bi trebala biti definirana uvjetom reakcije vozača (sposobnosti prepoznavanja elementa kružnog luka) koji iznosi 2 sekunde, a kao preporuku bi trebalo dati 5 s.

## 2.2. Vertikalna geometrija

Dimenzije minimalnog konveksnog polumjera vertikalne krivine prema RH pravilniku određuje se prema izrazu [4]:

$$R_{min} = \frac{P_z^2}{2 \cdot (\sqrt{h_0} + \sqrt{h_1})^2} \quad (1)$$

gdje je:

- $R_{min}$  (m) - najmanji polumjer konveksnog vertikalnog zaobljenja
- $P_z$  (m) - potrebna zaustavna preglednost, (usvaja se uzdužni nagib koji daje veći  $P_z$ )
- $h_0$  (m) - visina oka vozača 1.0 m
- $h_1$  (m) - visina skrivenog dijela zapreke

Istraživanja u Nizozemskoj (preuzeta kao preporuka za RSA) pokazala su da vozaču treba dodatno vrijeme u odnosu na vrijeme reakcije 2 s i preporuka je proračun  $R_{min}$  za dvostruku zaustavnu duljinu  $2 P_z$  [6].

## 2.3. Poprečni profil

### 2.3.1. Bankina

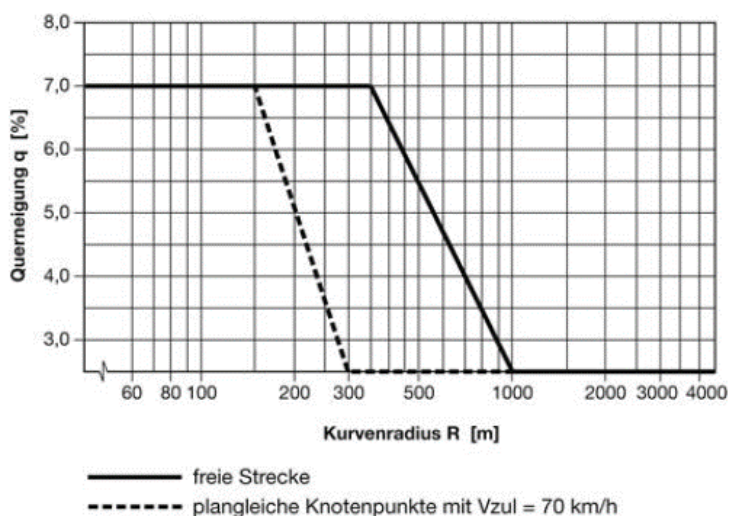
Širina bankine prema RH pravilniku ovisna je o brzini [4]:

- 1.50 m, za  $V_r \geq 80$  km/h (i autoceste)
- 1.20 m, za  $70 \text{ km/h} \leq V_r < 80$  km/h
- 1.00 m, za  $40 \text{ km/h} \leq V_p < 70$  km/h

Problem često nastaje u zonama gdje je nužna elastična odbojna ograda koja zahtijeva minimalnu širinu 1.25 m. Stoga je logično uvesti minimalnu širinu bankine 1.25 m (u pojedinim državama je i uvedeno), a iznimno dopustiti eventualne manje širine bankine.

### 2.3.2. Poprečni nagib

Poprečni nagib kolnika u kružnom luku radi se prema računskoj brzini do 7 % za minimalni polumjer, a zatim opada rastom polumjera krivine. S obzirom da su operativne brzine u skladu s geometrijom (veći polumjer znači i veću brzinu), u kružnom luku vozilo nema dovoljne poprečne nagibe. Zato novi pravilnici i jesu uvažili ovu činjenicu te dali poprečni nagib za operativne brzine, kao što je i njemački RAL (grafikon na slici 3) [5].



Slika 3: Grafikon za poprečni nagib u krivinama različitih polumjera na cestama [5]

RAL daje poprečni nagib 7 % za sve polumjere do 350 m, što i jest kritična granica za prometne nesreće jer su značajnije razlike između operativne i računске brzine. Ovo je potvrdilo i istraživanje provedeno u RH na državnim cestama [7].

### 2.3.3. Proširenje kolnika u krivini

U horizontalnim krivinama radi se proširenje u krivini jer stražnji kotači vozila opisuju manji polumjer krivine od prednjih. Proširenje se izvodi za mjerodavno vozilo i svaki trak zasebno.



Pravilnik iznimno dopušta kombinaciju proširenja za mimoilaženje dvaju različitih mjerodavnih vozila. Ovdje često nastaje problem u tumačenju optimalnog proširenja. Naime, u dosta situacija na cestama gdje je mali broj teretnih vozila tumači se da je dovoljno proširenje za teretno vozilo u kombinaciji s osobnim vozilom. Teoretski to je i logično jer se teretno vozilo i osobno vozilo mogu mimoići u krivini.

Problem je što je središnja linija geometrijska sredina i prema tome teretno vozilo iz oba smjera prelazi u suprotni trak. Vozač ne očekuje vozilo iz suprotnog smjera u svom traku te tako dolazi do prometnih nesreća.

Potrebno je izričito zabraniti kombinaciju mjerodavnih vozila prema prethodnom obrazloženju.

#### **2.3.4. Nagibi pokosa**

Nagib pokosa nasipa se izvodi 1:1.5 i u većini slučajeva za niže nasipe i trapezne kanale nije predviđena elastična odbojna ograda. Na ovim nagibima se vozilo prevrne vožnjom niz nagib. Poželjno je bar kao preporuku predložiti pokose nagiba 1:3 na kojem se vozilo ne prevrće kako bi se naglasio ovaj problem, a u nekim situacijama i izbjegla ograda.

#### **2.4. Zone pretjecanja**

Minimalna pretjecajna preglednost računa se kao pretjecanje sporijeg vozila brzinom većom za 15 km/h od računске brzine sporijeg vozila, a vozilo iz suprotnog smjera također vozi računskom brzinom i operacija traje 10 sekundi. U realnim uvjetima vozilo iz suprotnog smjera vozi operativnom brzinom koja je veća od računске. Stoga bi pretjecajna preglednost trebala biti dvostruka operativna brzina  $2 V_{op}$ .

Dodatni problem predstavljaju duljine pretjecajnih zona u smislu njihove učinkovitosti. Istraživanja u BiH [8] i Španjolskoj [9] pokazuju da kratke zone imaju vrlo malu mogućnost pretjecanja već za satna opterećenja preko 250 vozila po smjeru. Nemogućnost pretjecanja izaziva nervozu kod vozača te dolazi do neželjenih reakcija opasnih za sigurnost prometa.

Bilo bi poželjno dodati preporuku u proračun, npr .za trajanje operacije 15 s, kako bi se omogućile veće vremenske praznine za pretjecanje (nakon provedenih analiza).

#### **2.5. Dodatni trak**

Pravilnik za dodatni trak daje vozno-dinamičke i prometno-tehničke uvjete (nedostaje i ekonomski, ali nije problem sigurnosti), od kojih jedan neispunjeni opravdava dodatni trak.

U praksi je, nažalost, dodatni trak često sveden na uspon, a pad koji je teretnom vozilu možda čak i problematičniji je zanemaren. Tome dodatno doprinosi i pravilnik po kojem treba analizirati potrebu dodatnog traka na padu. Nemogućnost pretjecanja na padu izaziva nervozu vozača te pretjecanje na nedopuštenim i opasnim mjestima. Stoga je nužno izjednačiti važnost dodatnog traka oba smjera. Dodatni trak dugi je niz godina tretiran kao trak za spora vozila koja se ispliću i upliću u vozni trak. Zbog sigurnosti je dodatni trak za spora vozila postao trak za brza vozila, odnosno pretjecajni trak. Razlog su nesreće koje su se događale zbog naglog ubacivanja teretnih vozila iz dodatnog u vozni trak. Standardno rješenje je da vozni trak ima kontinuitet, a dodatni trak služi za pretjecanje.

Također, u pravilnik je potrebno ubaciti i skicu završetka pretjecajnog traka kako se ne bi događala rješenja s kontinuitetom tog traka.

## **2.6. Zaustavni trak**

Širina zaustavnog traka prema pravilniku iznosi [4]:

- 2.50 m ( iznimno 2.30 ) - na autocestama
- 1.75 – 2.50 m - na brzim cestama

Često se događaju prometne nesreće kod kojih se vozilo zaustavi na zaustavnom traku i na njega naleti vozilo u voznom traku. To je osobito problem kod teretnih vozila koja su sama širine 2.5 m i vozač otvara vrata vozila te izlazi na vozni trak. Iz navedenih razloga se u svijetu uvode širine voznog traka minimalno 3.0 m.

Zbog učestalosti prometnih nesreća ovakvog tipa pojedine države (npr. Mađarska i Srbija) provode kampanje nezaustavljanja na zaustavnom traku bez nužne potrebe. Zaustavljanje je često rezultat neodgovornosti vozača, ali i nepoznavanja svrhe zaustavnog traka. Kako je engleski naziv trak za hitne slučajeve (emergency lane), možda bi trebalo i promijeniti sam naziv zaustavnog traka kako bi se povećala svijest vozača o ovom problemu.

## **3. Zaključak**

Predložena poboljšanja pravilnika su s ciljem povećanja sigurnosti prometa kako bi se preventivno djelovalo na sigurnost. Iako je pravilnik u stvari samo okvir za projektiranje, u praksi je, nažalost, ograničavajući za projektante i investitore.

Kako se može vidjeti iz prethodnog, noviji pristupi su okrenuti realnim uvjetima odvijanja prometa i vozaču sa svim svojim psiho-fizičkim ograničenjima. Dosadašnje poimanje estetike na cestama ustvari predstavlja sigurnost jer ono što nije ugodno oku vozača predstavlja opasnost pravljenja pogreške.

Pojedina predložena rješenja su rezultat provedenih europskih istraživanja koja su već primijenjena u novijoj regulativi i iako se u startu čine skuplja rješenja, u konačnici se pokazuju isplativijim.

## **Literatura**

- [1] Road Safety Inspection Manual, South East Europe Transport Observatory (SEETO), EC/SEETO, 2009. i revidirana u verziji 2016.
- [2] Direktiva 2008/96/EZ1936 europskog parlamenta i vijeća od 19. 11. 2008. o upravljanju sigurnošću cestovne infrastrukture, (on-line) dostupno na linku:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0096&from=EN>
- [3] Direktiva (EU) 2019/1936 europskog parlamenta i vijeća od 23. 10. 2019. o izmjeni Direktive 2008/96/EZ o upravljanju sigurnošću cestovne infrastrukture, (on-line) dostupno na linku:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1936&from=EN>
- [4] Pravilnik o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa, Narodne novine, broj 59/96, Zagreb 2001.
- [5] Richtlinien für die Anlage von Straßen, Bonn, 2012.
- [6] Sustainable safe road design, A practical manual, Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management, 2004.

- [7] Cvitanić, D., Maljković, B. 2017: Operating speed models of two-lane rural state roads developed on continuous speed data, Tehnicki Vjesnik – Technical Gazette, 24(6), pp. 1921, <https://doi.org/10.17559/TV-20150304133437>
- [8] Čutura, B., Cvitanić, D., Lovrić, I., Application of passing sight distance in road design,
- [9] Moreno, A.T., Lorca, C., Washburn, S., Bessa, J.E.J., Garcia, A.: Effect of Average passing Zone Length on Spanish Two-Lane Highways Traffic Performance, Transportation Research Board 95th Annual Meeting,. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.12>

## ANALIZA RELATIVNIH DEFORMACIJA I NAPREZANJA NA MOSTU VRANDUK 2

**Marino Jurišić<sup>1</sup>, Goran Šunjić<sup>2</sup>, Neda Bebek<sup>3</sup>**

(1) *Fakultet Građevinarstva, Arhitekture i Geodezije, Sveučilište u Mostaru, Bosna i Hercegovina, marino.jurisc@fgag.sum.ba*

(2) *Fakultet Građevinarstva, Arhitekture i Geodezije, Sveučilište u Mostaru, Bosna i Hercegovina, goran.sunjic@fgag.sum.ba*

(3) *HERING d.d., Bosna i Hercegovina, nbebek@hering.ba*

### Sažetak

Ovaj rad predstavlja dio istraživanja provedenog na prednapetim betonskim mostovima izgrađenim metodom slobodne konzolne gradnje. U uvodu je prvo opisana konstrukcija mosta. Postavljena je oprema za kontinuirani monitoring mosta i ukupno osam senzora za mjerenje relativnih deformacija na betonu i čeliku za prednapinjanje. Most se pratio od početka do kraja izgradnje te dva mjeseca nakon završetka. Napravljen je numerički model koji realno opisuje ponašanje mosta tijekom i nakon izgradnje uzimajući u obzir sva opterećenja, kao i vremenski ovisne utjecaje u betonu i prednapetom čeliku. Analizirani su rezultati numeričkog modela s vremenskim utjecajem i bez njega te su uspoređeni s izmjerenim podacima gdje se vidi dobra podudarnost mjerenih i numeričkih rezultata. Zaključuje se da odabrani numerički model s uključenim vremenskim utjecajima jako dobro opisuje stvarno ponašanje mosta. Zasebno je analiziran i utjecaj reologije koji daje razliku napreznja od približno 0.40 MPa. *Ključne riječi: relativne deformacije, napreznja, monitoring, slobodno konzolna gradnja, prednapeti betonski mostovi*

## STRAIN AND STRESS ANALYSIS ON THE VRANDUK 2 BRIDGE

### Abstract

This paper presents a part of research conducted on prestressed concrete bridges constructed by the balanced cantilever construction method. The bridge structure is described in the introduction. Equipment for continuous strain monitoring as well as eight sensors on concrete and prestressing steel were installed. The bridge was monitored during the entire construction period and for two months after. A numerical model that simulates real structure behavior during and after construction was made, taking into account the time-dependent effects on concrete and prestressing steel. The results of the numerical model are analyzed with and without time-dependent effects and show good overlap with the measured data. It is concluded that the chosen numerical model with time-dependent effects correctly presents real bridge behavior. Material rheology analysis shows a 0.40 MPa difference in stress.

*Keywords: strain, stress, monitoring, balanced cantilever construction, prestressed concrete bridges*

## **1. Uvod**

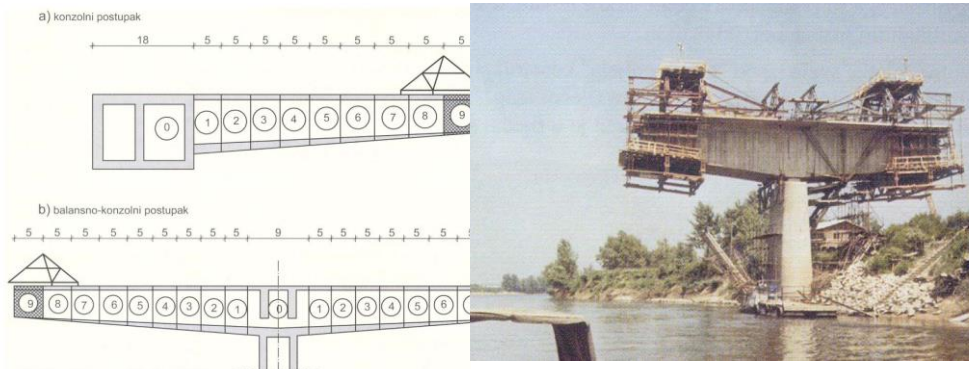
Slobodna konzolna gradnja je postupak izrade rasponske konstrukcije mosta kroz slijed segmenata kod kojeg svaki izgrađeni segment nosi težinu idućeg segmenta, a u nekim slučajevima i težinu skele ili proizvodnog pogona. Ovi mostovi ranije su se radili uglavnom isključivo od čelika, dok se sada često koristi prednapeti beton s rasponskom konstrukcijom sandučastog presjeka i promjenjive visine. Svaki dio ili segment integrira se u rasponsku konstrukciju neposredno po postizanju dovoljne čvrstoće pri čemu postaje nosivi dio konstrukcije te polazna točka za daljnje napredovanje. U slučaju prednapetih betonskih mostova stabilnost konzole u svakoj fazi izgradnje osigurana je kablovima od prednapetog čelika u gornjoj zoni rasponske konstrukcije kojima se dužina povećava rasponskom konstrukcijom. Segmenti mogu biti betonirani na licu mjesta na pokretnim skelama, a mogu biti i predgotovljeni, transportirani i postavljeni na mjesto pomoću posebnih dizalica [1].

Od starih vremena ova metoda se koristila za izgradnju lukova u Europi i Južnoj Americi, kao i za gradnju drvenih mostova. U svojim pisanjima Cezar spominje radove Gala koji su postavljali debla ortogonalno u horizontalnim redovima te se kasnije ispunjavali kamenim materijalom koji je služio kao balast. Slične konstrukcije izvodile su se i drugdje u svijetu, a neke se još uvijek mogu pronaći u Kini, Indiji i Tibetu. Američki inženjer Thomas Pope 1811. godine projektirao je drveni most raspona 550 m koji je imao jako plitak luk naslonjen na dva zidana upornjaka iz kojih se gradio kao konzolna konstrukcija sastavljanjem predgotovljenih dijelova [2]. Inženjeri 19. stoljeća razumjeli su da u odnosu na prostu gredu, kontinuirani most preko više oslonaca ima povoljniju sliku naprezanja te se mogu postići veći rasponi [3]. Heinrich Gerber bio je jedan od inženjera koji je patentirao zglob u polju grede preko više raspona te se smatra prvim koji je izradio takvu konstrukciju [4]. Zglob ovakav sustav pravi statički određenim što dovodi do toga da most može podnijeti diferencijalno slijeganje oslonaca bez parazitnih naprezanja u konstrukciji. Osim toga inženjeri su mogli lakše izračunati sile i napone u konstrukciji [3]. U 19. i 20. stoljeću metoda konzolne gradnje se primjenjuje pri izgradnji lučnih i rešetkastih metalnih mostova koji većinom slijede princip konzola s upuštenim dijelom raspona. Most u Hassfurtu koji je dovršen 1867. smatra se prvim modernim konzolnim mostom s glavnim rasponom dužine 38 m. Osim njega valja spomenuti mostove: High Bridge u Kentucky-ju dovršen 1877., željeznički most preko Niagare dovršen 1883., most u Poughkeepsiju dovršen 1889, i najpoznatiji rani konzolni most Forth u Škotskoj dovršen 1890. i koji je 29 godina držao rekord najdužeg raspona na svijetu (518.16 m).

Pojavom armiranog betona počinje primjena ove metode na ovaj novi materijal. U 1928. godini Freyssinet je već radio na izradi segmenata lukova mosta Plougastel raspona 185 m. U obliku u kakvom postoji danas ova metoda se prvi put primjenjuje 1930. godine na mostu Herval preko rijeke Rio Peixe u Brazilu gdje su armaturne šipke nastavljane nazubljenim elementima. Caquot je projektirao most Donzere raspona 100 m u Francuskoj, ali ova tehnika nije puno razvijana na mostovima od armiranog betona zbog velike potrebne armature da se osiguraju konzole i širine pukotina u gornjoj zoni rasponske konstrukcije. Nakon razvitka prednapinjanja koje je prikladno za konzolnu gradnju, dolazi do snažnog razvoja metode. Freyssinet je koristi

1945. - 1950. za izgradnju mosta Luzancy, pet mostova preko rijeke Marne i vijadukta Caracas.

Tehnika gradnje slobodno konzolnih mostova je da se prvo izradi stup na vrhu kojeg se izvodi početni dio rasponske konstrukcije tzv. bazni segment (pier head). Na baznom segmentu podižu se pokretne skele („kretke“) koje će pridržavati oplatu pojedinih segmenata mosta. Glavni nosivi dio kretke je romb koji se preko šine sidrima pričvrsti na gornji rub rasponske konstrukcije. Nakon što se postavi oplata, pristupa se izradi armature segmenta, a potom betoniranju. Čim beton postigne dostatnu čvrstoću, prednapinju se kablovi konzolne gradnje u gornjem dijelu segmenta kako bi se segment aktivirao. Onda se otpušta oplata i kretka se preko šina gura prema naprijed da dođe u poziciju izrade idućeg segmenta. Ovaj postupak se ponavlja dok se ne završi konzola mosta. Bitno je naglasiti da ovaj proces kod slobodno konzolnih mostova ide istovremeno na lijevoj i desnoj strani konzole kako bi konzola ostala u ravnoteži. Prednosti ovakve gradnje su mnogobrojne. Prvo rasponske konstrukcije se rade bez ikakvog dodira s tlom što omogućava izgradnju konstrukcija preko plavnih rijeka ili jako dubokih i strmih jaruga. Ova metoda može se koristiti i za izgradnju konstrukcija različitih geometrija. Rasponska konstrukcija može biti konstantne ili promjenjive visine (linearno, parabolično, kubično) (Slika 1.)

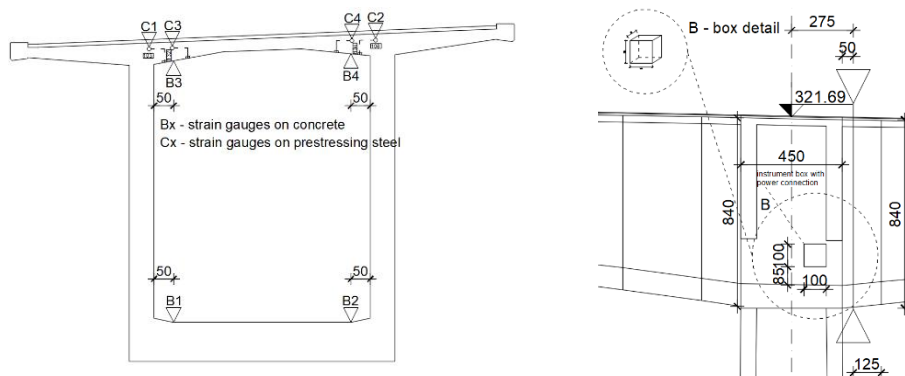


**Slika 4.** Princip izvedbe mostova slobodno konzolnom gradnjom

## 2. Postavljanje opreme za monitoring

Istraživanje se provodi na lijevom mostu Vranduk 2 koji se nalazi u neposrednoj blizini grada Zenice na koridoru Vc u Bosni i Hercegovini. Most je prednapeta betonska konstrukcija izgrađena metodom slobodne konzolne gradnje. Ima tri raspona ukupne dužine 340 m, a glavni raspon je 150 m.

Rasponska konstrukcija je sandučastog presjeka promjenjive visine od 8.40 m nad stupom sve do 4.00 m u sredini polja. Napravljena je iz ukupno 15 segmenata ne uključujući spojni segment. Senzori za mjerenje relativne deformacije postavljeni su u presjek baznog segmenta na stupu S1L neposredno van dijafragme prema centralnom rasponu kako bi se eliminirao utjecaj dijafragme (Slika 2.)



**Slika 5.** Presjek na kojem su ugrađeni mjerni senzori

Cilj istraživanja je praćenje promjena relativnih deformacija tijekom cijelog procesa izgradnje konstrukcije te analiziranje utjecaja fazne gradnje i reologije na relativne deformacije i naprezanja. Ugrađuje se ukupno 8 senzora, od kojih 4 na beton u rubovima presjeka, a 4 na prednapeti čelik konzolne gradnje na kablove prvog i sedmog segmenta koji se nalaze u gornjoj ploči. Senzori su mjerne trake nominalnog otpora 120  $\Omega$  koje daju promjenu relativne deformacije preko promjene otpora u traci. Mjerne trake se preko nastavnih kablova spajaju u uređaj za prikupljanje podataka QuantumX 840A s maksimalno 8 ulaza. Uređaj se nalazi u kutiji postavljenoj za mjerenje te je povezan na računar koji preko programa CatmanAP prikuplja, sprema i obrađuje podatke. Prije postavljanja senzora površina je očišćena i pripremljena, senzori su za beton zalijepljeni dvokomponentnim ljepilom, dok su na prednapeti čelik zalijepljeni trenutnim ljepilom. Nakon postavljanja senzori su zaštićeni masom protiv mehaničkih udara i vlage oko koje je postavljen sloj silikona zbog dodatne zaštite (Slika 3.)

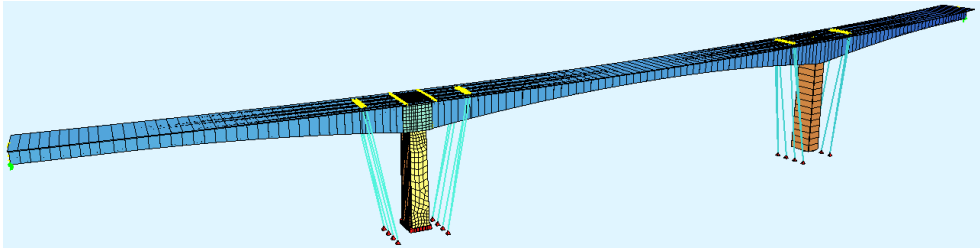


**Slika 6.** Mjerni senzori na betonu i prednapetom čeliku

### 3. Numerički model mosta

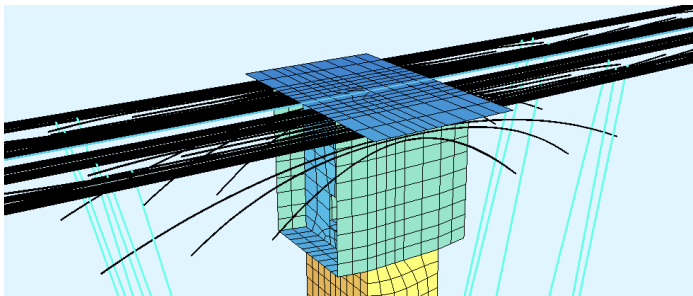
Numerički model mosta napravljen je u računalnom programu SOFiSTiK (Slika 4.) Napravljen je „hibridni“ prostorni model sastavljen od ploča i linijskih elemenata. Horizontalna krivina je uključena u model. Svi kablovi za prednapinjanje uneseni su pojedinačno, ukupno 124 kabela koji služe za slobodnu konzolnu gradnju i 50 kontinuitetnih kablova koji služe za preuzimanje opterećenja u eksploataciji. Modelirane su privremene zatege koje služe za pridržavanje konstrukcije u fazi izgradnje sve do spajanja i prednapinjanja centralnog raspona. Pločasti

elementi su korišteni za modeliranje stupa S1L i cijelog baznog segmenta rasponske konstrukcije uključujući i dijafragme, dok su linijski elementi korišteni za modeliranje ostatka konstrukcije. Pločasti i linijski dijelovi modela su povezani (efektivno monolitizirani) preko constraintova koji prenose sve rezne sile. Rađeno je na ovakav način da bi se mogla simulirati kompletna konstrukcija mosta tijekom izgradnje te u periodu nakon izgradnje i prednapinjanja kablova kontinuiteta. Stup S1L i bazni segment modelirani su pločasto kako bi se dobila stvarna raspodjela naprezanja kroz širinu ploče koja se može usporediti s mjerenim rezultatima.



**Slika 7.** Numerički model mosta Vranduk 2 (lijevi most)

Modelom su obuhvaćene stvarne faze izgradnje mosta uključujući premještanje kretke, betoniranje pojedinog segmenta, prednapinjanje vremenski korak za puzanje i skupljanje između svake faze. Puzanje i skupljanje se računa prema EN 1992-1-1:2004+AC:2010. Usvojena je vlažnost od 70 % i temperature od 20°C. Svaki naredni segment se tangencijalno postavlja u odnosu na prethodni kako se u stvarnosti i događa na gradilištu. Gubici u kablovima za prednapinjanje uslijed puzanja i skupljanja betona, kao i relaksacije čelika, uzeti su u obzir. Razvoj čvrstoće betona se uzima u obzir prema CEB-FIP model code 1990.

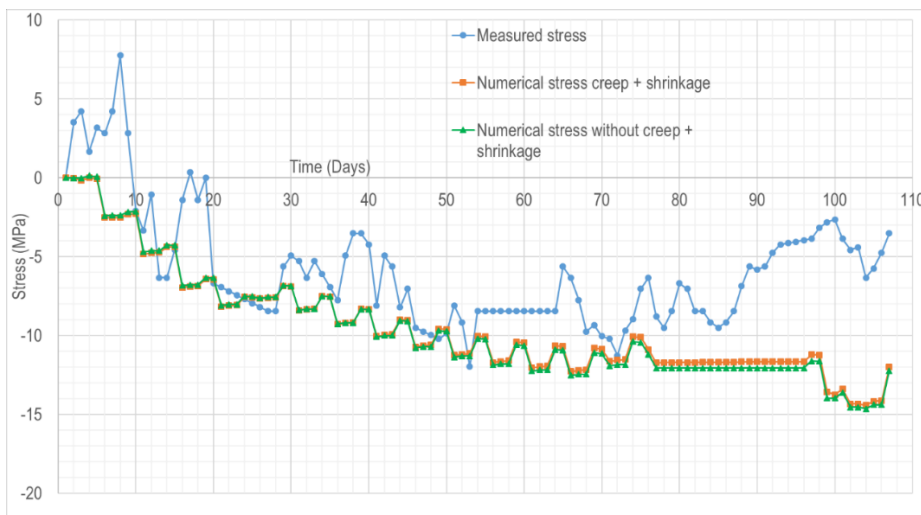


**Slika 8.** Prikaz spoja linijskog i pločastog modela sa uključenim kablovima

## 4. Rezultati

Monitoring je trajao ukupno 107 dana s prekidima. U nastavku je prikazana analiza rezultata mjernog mjesta B1 (mjerenje na gornjem lijevom rubu donje ploče) iz koje je vidljivo da postoji dobro podudaranje numeričkog modela i mjerenih rezultata. Prikazani su i rezultati bez uključene reologije betona te razlike u odnosu na model s uključenim vremenskim utjecajima (Slika 6.)





Slika 9. Rezultati analize na mjernom mjestu B1

## 5. Zaključak

Iz dijagrama (Slika 6.) vidljivo je da ima razlika numeričkog modela u odnosu na mjerene rezultate, najvjerojatnije zbog nedostatka kompenzacije temperature i slučajnih tereta pri izgradnji koji nisu uzeti u obzir u numeričkom modelu. Osim toga vidljivo je jako dobro poklapanje i trend mjerenih te numeričkih rezultata. Vidljive su faze izgradnje segmenata (betoniranje, prednapinjanje) za sve segmente. Najveća razlika je na završetku monitoringa (cca 8 MPa), najvjerojatnije uslijed već spomenutih razloga. Razlike u naprezanjima s vremenskim utjecajima i bez njih najveće su pred kraj monitoringa (zbrajaju se od početka) i iznose približno 0.40 MPa.

## Literatura

- [1] Mathivat, J.: The cantilever construction of prestressed concrete bridges, Editions Eyrolles, 1979., ISBN 0471103438
- [2] Grupa autora: Design guide – Prestressed concrete bridges built using the cantilever method, Setra, 2003.
- [3] DuBois A. J.: The mechanics of engineering, John Wiley & Sons, 1902.
- [4] Bender, C.: Discussion on Cantilever Bridges by C.F. Findlay, Canadian Society of Civil Engineers, 1890.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.10>

## PLANIRANJE I PROGRAMIRANJE ISTRAŽIVAČKIH PROSTORA – MODELI LABORATORIJA PRIRODNIH ZNANOSTI

Marija Džapo<sup>1</sup>, Bojan Baletić<sup>2</sup>, Silvio Bašić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, [mdzapo@grad.hr](mailto:mdzapo@grad.hr), [sbasic@grad.hr](mailto:sbasic@grad.hr)

(2) Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, [bbaletic@arhitekt.hr](mailto:bbaletic@arhitekt.hr)

### Sažetak

Tema rada je istražiti zahtjeve koji se prilikom planiranja i programiranja laboratorijskih zgrada pojavljuju pred korisnicima i projektantima.

Prezentiran je dio istraživanja koje se provodi u sklopu istraživačke radionice na Doktorskom znanstvenom studiju Arhitekture i urbanizma na Arhitektonskom fakultetu u Zagrebu. Obuhvaćen je pregled razvoja laboratorijskih zgrada, suvremeni utjecaji i trendovi razvoja te kriteriji za programiranje i projektiranje laboratorijskih zgrada.

*Ključne riječi: laboratoriji prirodnih znanosti, programiranje, kriteriji za projektiranje*

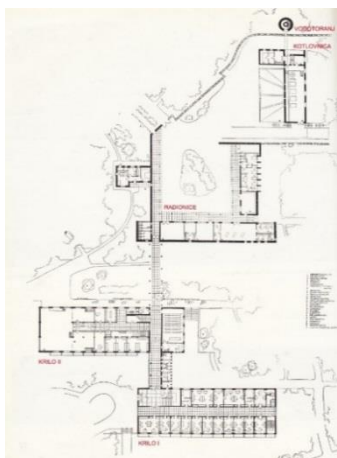
## PLANNING AND PROGRAMMING OF RESEARCH SPACES – NATURAL SCIENCE LABORATORY MODELS

### Abstract

The topic of the paper is to research requirements that appear before users and designers during the planning and programming of laboratory buildings.

A part of research conducted in workshop at the Doctoral Scientific Study of Architecture and Urbanism at the Faculty of Architecture in Zagreb is presented: an overview of the development of laboratory buildings, contemporary influences and development trends, and criteria for programming and designing laboratory buildings are included.

*Keywords: natural science laboratories, programming, design criteria*



## 1. Uvod

Izazovi s kojima se susreće suvremena arhitektura dodatno su potencirani kada su u pitanju laboratorijske zgrade koje su tehnološki vrlo složene i trebaju zadovoljiti širok raspon zahtjeva (funkcionalnost, tehnologija, ekonomska isplativost, održivost, oblikovanje, zaštita okoliša...)

Novi propisi i standardi, zajedno s inovativnom tehnologijom i načinom rada te novim istraživačkim procesima predstavljaju stalan izazov za projektiranje laboratorijskih zgrada. Za buduće znanstveno-istraživačke zgrade to znači kontinuiranu potrebu da se iznova promišlja o tome kako i gdje se istraživanja provode te kako okruženje (zgrada) u kojem se istraživanje provodi može utjecati na istraživački proces.

## 2. Razvoj laboratorija prirodnih znanosti

Središnji sadržaj istraživačkih prostora je laboratorij – izvorno sveobuhvatan radni prostor koji je prvotno sadržavao sve što je znanstveniku potrebno - radni pult i uredski prostor, tj. laboratorijski prostor koji se oblikovao u skladu s dostupnim tehnologijama istraživanja - tadašnjim jednostavnim istraživačkim postupcima. Arhitektonsko oblikovanje bilo je u skladu sa stilskom arhitekturom određenog vremena.

Razvojem prirodnih znanosti u 19. st. takvi istraživački prostori se pojavljuju u sklopu sveučilišta (primarno u Njemačkoj), a tek nakon 2. svjetskog rata i u sklopu novoformiranih istraživačkih centara korporacija te novoosnovanih istraživačkih instituta:

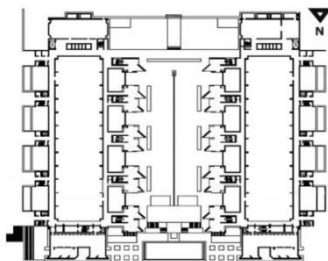
- Johnson Wax & Co Headquarters, Reine, Wisconsin, F.L.Wright  
(Zgrada administracije 1936. - 1939. i Istraživački toranj 1950. godine - stubište, dizalo i servisne prostorije su u centru tornja, a laboratoriji po obodu; zgrada se od 80-ih godina više ne koristi za tu namjenu jer ne zadovoljava zahtjeve zaštite od požara) [1]
- Richard Medical Research Building, University of Pennsylvania, Philadelphia, L.I.Khan, 1957.  
(tlocrtna organizacija u obliku klastera, tri tornja s laboratorijima, dva s uredima i jedan toranj s animalnom platformom, tornjevi su fleksibilnog tlocrta, sa stubištem izvan volumena zgrade) [1]
- Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Kazimir Ostrogović  
(formativni period od 1951. - 1970. - izgradnja je realizirana u dvije etape; tlocrtna organizacija - laboratoriji sa središnjim hodnikom; instalacije u podrumu i tavanu; laboratorijska krila I i II, odnosno krila III i IV su pravokutnog tlocrta s izmaknutim volumenima paralelnim sa slojnicama terena; na južnim pročeljima su masivni armiranobetonski okviri u funkciji brisloleja, sjeverna pročelja su jednostavno oblikovana, s pravilnim nizovima prozora) [2]

**Slika 1.** (a) Institut R. Bošković, tlocrt 1951. god [izvor: Arhitektura 2:80, 1954. god.] (b) Institut R. Bošković, pogled s juga 60-ih god, [izvor: Konzervatorski elaborat - Institut R. Bošković ]

Veći pomak u funkcionalnoj organizaciji, a posljedično i oblikovanju laboratorijskih prostora, dogodio se 60-ih god. 20 st. s projektom Salk Instituta u Kaliforniji 1965. godine (L. I.

Kahn). To je bio jedan od prvih laboratorijskih objekata koji je projektiran u suradnji sa znanstvenicima i koji je omogućio prostore prikladne za njihova istraživanja. Laboratorijska zgrada Instituta je sastavljena iz dva simetrična krila; laboratorijski prostor je otvorenog tlocrta, sa stupovima po rubu dok su uredski prostori, pomoćne prostorije i stubišta smješteni u zasebnim volumenima po obodu zgrade. Iznad svake etaže laboratorija je servisna etaža s razvodnom instalacija.

Salk Institut oblikovan je u skladu s tehnologijom istraživačkog procesa (prilikom istraživanja znanstvenici dio vremena provode u laboratoriju, a dio u uredu), središnji laboratorijski prostor je fleksibilan, omogućuje znanstvenicima timski rad, vršenje eksperimenata i praćenje rezultata, a uredski prostori po obodu omogućuju individualni rad. [1]



**Slika 2.** (a) Salk institut, La Jolla, San Diego, Kalifornija tlocrt [izvor:www.pinterest.com] (b) Salk institut, pročelje [izvor: www.archdaily.com]

Tlocrtna shema Salk Instituta se u raznim varijantama koristi i danas, prije svega kao dobro organizirana funkcionalna shema. No, tehnologija istraživanja se u odnosu na razdoblje Salk Instituta promijenila. Razvojem tehnologije i istraživačkih postupaka ova funkcionalna shema zgrade se dopunjava instrumentalnim sobama i brojnim infrastrukturnim sustavima.

Tehnološka dostignuća ubrzavaju proces istraživanja i njegovo plasiranje od otkrića do tržišta. Suvremeno istraživačko okruženje zahtijeva sofisticirane uređaje – tehnološku opremu koja

definira tehničke uvjete laboratorijskih i/ili pratećih prostora te generira veliku količinu podataka koju je potrebno pohraniti i obraditi. [3]

Nove tehnologije dovode do česte promjene u istraživačkom procesu što direktno utječe na tehnološki proces koji sadrži redosljed te opis metoda rada i radnih operacija pa zahtjevi definirani tehnološkim procesom/projektom zadiru u oblikovne aspekte, ali i druge elemente zgrade.

Pod utjecajem globalizacije mijenja se način istraživanja. Globalno tržište potiče spajanje istraživačkih tvrtki, osnivanje tehnoloških parkova gdje je veća vjerojatnost da će iskorak napraviti timovi, a ne pojedinci. Brišu se granice između tradicionalnih znanstvenih disciplina, npr. biologije, kemije, fizike, medicine... te dolazi do njihovog preklapanja. [4]

### **3. Suvremeni utjecaji i trendovi razvoja laboratorija prirodnih znanosti**

Umjetna inteligencija, robotika i automatizacija, baze podataka omogućuju nove oblike istraživanja; utječu ne samo na način na koji znanstvenici rade, već i na laboratorijske i druge prateće prostore.

Laboratorijski prostori bi trebali biti temeljeni na aktivnostima, organizirani oko različitih načina rada kao što su eksperimenti, fokusiran samostalni rad u uredu, grupni rad, sastanci, neformalno druženje... Ovim značajkama se laboratoriji transformiraju iz utilitarnog istraživačkog objekta u dinamičan društveni prostor koji može privući, motivirati i zadržati istraživača. Naglasak bi trebao biti na promicanju angažmana građana u znanosti i osnivanje DIY laboratorija i otvorenih znanstvenih inicijativa koje demokratiziraju pristup znanstvenim alatima i znanju. [5]

Tradicionalno znanstvena infrastruktura prilagođena je fizičkim potrebama istraživanja – laboratorijski uređaji smješteni u zgradama i opsluženi komunalnim uslugama. Razvojem znanosti i digitalizacijom znanost postaje prostorno decentralizirana, pojavljuju se nove tehnologije koje mijenjaju kako i gdje znanstvenici rade, što znači da treba gledati šire od tradicionalne laboratorijske zgrade i njenih usluga; treba razmotriti širu mrežu sustava, usluga i okruženja koja podržavaju inovacije. [5]

Laboratorijske zgrade su tehnološki vrlo složene građevine; važniji su uređaji, instalacije i kemikalije nego sama zgrada; sustav instalacija koji je podrška tehnologiji zauzima značajan dio prostora (primjerice u nekim laboratorijskim zgradama 1/3 presjeka su instalacije).

U protoku vremena mijenja se tehnologija i prioriteti, uvode se nova ispitivanja što zahtijeva fleksibilnost laboratorijskih zgrada.

Također, suvremeni laboratorij ne funkcionira bez pametnih sustava (kontrolirani uvjeti prostora); sva istraživanja se prate, sve se evidentira, postoji zapisnik o svemu što se radi i potrebno je imati certifikat o propisanim uvjetima (BMS – Building Management System – sustav upravljanja zgradom; sustav koji treba službu za nadzor zgrade).

Trendovi razvoja vode k sve većoj automatizaciji (već sada su u laboratorijima prisutni pametni uređaji). Automatizacija se često podcjenjuje, servisni prostori su nešto na čemu se najviše štedi, no oni bi mogli zauzimati i do 50 % tlocrtnne površine u budućnosti.

## **4. Ciljevi istraživanja, metodologija i očekivani rezultati**

Istraživanje obuhvaća analizu literature o laboratorijima prirodnih znanosti, analizu tipologije, povijesni pregled razvoja, analizu standarda za projektiranje laboratorija te analizu primjera kroz intervjue s korisnicima (znanstvenicima).

U literaturi su prikazani primjeri laboratorijskih zgrada s različitim programima i arhitektonskim rješenjima, no nužno je imati metodu kojom bi se objektivizirali parametri programiranja. [6] Ciljevi istraživanja su detaljnija sistematizacija laboratorija prirodnih znanosti (dopuna sistematizacije koja trenutno postoji u literaturi) i definiranje metode koja bi se mogla primijeniti na programiranje laboratorijskih zgrada gdje će se uzeti u obzir svi biti elementi koji utječu na strukturu i prostori program:

- unutarnje odrednice vezano za različite tipove istraživanja i tehnološke procese
- broj korisnika, odnosno potrebna površina laboratorija i dužina pulta po korisniku
- veličina, odnosno normativi zajedničkih i pratećih sadržaja
- odnos neto i bruto površine.

Postupak utvrđivanja programa, potrebnih površina i prostornih uvjeta za projektiranje laboratorija prirodnih znanosti analizirat će se s različitim stajališta: normativnih i prostorno shematskih. [6]

U programiranju i projektiranju laboratorijskih zgrada potrebno je uključiti sve sadržaje koji čine zaokruženu prostorno-funkcionalnu cjelinu. [6]

## **5. Zaključak**

Laboratorijske zgrade su tehnološki vrlo složene, i trebaju zadovoljiti širok raspon zahtjeva – od funkcionalnosti, tehnologije, tehnološke i opće opreme, ekonomske isplativosti, održivosti, oblikovanja. Također, one su mjesto inovativne proizvodnje i kao takve su izložene zahtjevima za kontinuirane modifikacije.

Suvremena arhitektura bi trebala težiti optimalnom odnosu svih ovih elemenata što može biti veliki izazov kada se radi o zgradama gdje su standardne dominantne funkcionalnost i ekonomičnost.

Programiranje laboratorija proizlazi iz njihovih unutarnjih odrednica (tehnološki proces istraživanja, trendovi razvoja..)

Program se obično izrađuje u suradnji projektanta i korisnika (istraživača).

Osnovni podatak za projektiranje laboratorija uz potrebnu površinu su tehnološki zahtjevi opreme i prostorni uvjeti .

## **Literatura**

- [1] Hardo Braun, Dieter Gromling: Research and Technology Buildings – A Design Manual, 2005. Brickhauser – Publishers for Architecture, Basel Switzerland
- [2] Konzervatorski elaborat – Institut Ruđer Bošković, Bijenička cesta 54, Grad Zagreb – Gradski zavod za zaštitu spomenika, Zagreb, svibanj 2018. god., izradili: Eva Radolović, Željka Staničić, Martina Knezović, Sanja Veršić, Barbara Lonjak Zlopaša

- [3] Martin D. Raab: Meeting New Demands in Research Facilities, Research Management, Vol.28, No. (March-April 1985.), pp. 34-41; Taylor&Frances, Ltd.
- [4] Daniel D. Watch, Stephen A. Klimant: Building Type Basics for Research Laboratories, Perkins&Will, 2001., John Wiley&Sons
- [5] Stephanie Schemel, Matt Carreau, Jenifer DiMambro, Gereon Uerz: Future of Labs – Elements of a Future Scientific Research Ecosystem, Arup, 2020. London
- [6] Milan Čanković, Ivan Juras: Podrobno programiranje i prostorna kvantifikacija ustrojbenih jedinica Sveučilišta u Zagrebu, Prostor, Vol. 6 (1998.), No. 1 - 2 (15 - 16)

### **Izvori fotografija:**

Slika 1. (a) Arhitektura, broj 2:80, 1954.god., obrada: autor

(b) Konzervatorski elaborat – Institut Ruđer Bošković , Bijenička cesta 54, Grad Zagreb – Gradski zavod za zaštitu spomenika, Zagreb, svibanj 2018.

Slika 2. (a) <https://www.pinterest.com/pin/302726406177792330/>

(b) <https://www.archdaily.com/61288/ad-classics-salk-institute-louis-kahn>



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.20>

## ISTRAŽIVANJE URBANISTIČKOG RAZVOJA KUNE PELJEŠKE

Emanuela Tomelić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Republika Hrvatska, [etomelic@gradst.hr](mailto:etomelic@gradst.hr)

### Sažetak

Pelješac 1333. godine dolazi pod vlast Dubrovačke Republike koja provodi prvu poznatu podjelu poluotoka. Zemlja je razdijeljena među dubrovačkim plemstvom, a lokalnom stanovništvu nametnuti su kmetski odnosi koji traju sve do razdoblja Austro-Ugarske uprave. Tema ovog rada je istraživanje urbanističkog razvoja Kune Pelješke, centralnog naselja Pelješke Župe. U današnjem naselju koje je s vremenom izgubilo izvornu urbanističku strukturu mogu se raspoznati dva glavna tipa gradnje. Prvi tip pojavljuje se u 15. stoljeću, u doba Dubrovačke Republike. Tad su naselja građena prema određenim pravilima koja su propisana dubrovačkim statutom i drugim aktima vezanim za gradnju. Drugi tip pripada 19. stoljeću, dobu Austro-Ugarske te je usko vezan za poboljšanje ekonomske moći lokalnog stanovništva tj. procvata trgovine i pomorstva.

*Ključne riječi: Kuna Pelješka, planirana naselja, Dubrovačka Republika, Austro-Ugarska, Pelješac, Pelješka Župa*

## RESEARCH ON KUNA OF PELJEŠAC URBAN DEVELOPMENT

### Abstract

In 1333 Pelješac came under the rule of the Republic of Dubrovnik, which carried out the first known division of the peninsula. The land was divided among the Dubrovnik nobility and serfdom relations were imposed on the local population, which lasted until the time of the Austro-Hungarian administration. The subject of this paper is research into the urban development in Kuna Pelješka, the central settlement of Pelješka Župa. Two main types of buildings can be distinguished in the present settlement, which has lost its original urban structure over time. The first type appears in the 15th century, at the time of the Dubrovnik Republic. At that time, settlements were built according to certain rules laid down in the Statute of Dubrovnik and other laws on building. The second type dates back to the 19th century, the time of Austria-Hungary, and is closely related to the improvement of the economic power of the local population, i.e. the flourishing of trade and shipping.

*Keywords: Kuna Pelješka, planned settlements, Dubrovnik Republic, Austria-Hungary, Pelješac, Pelješka Župa*



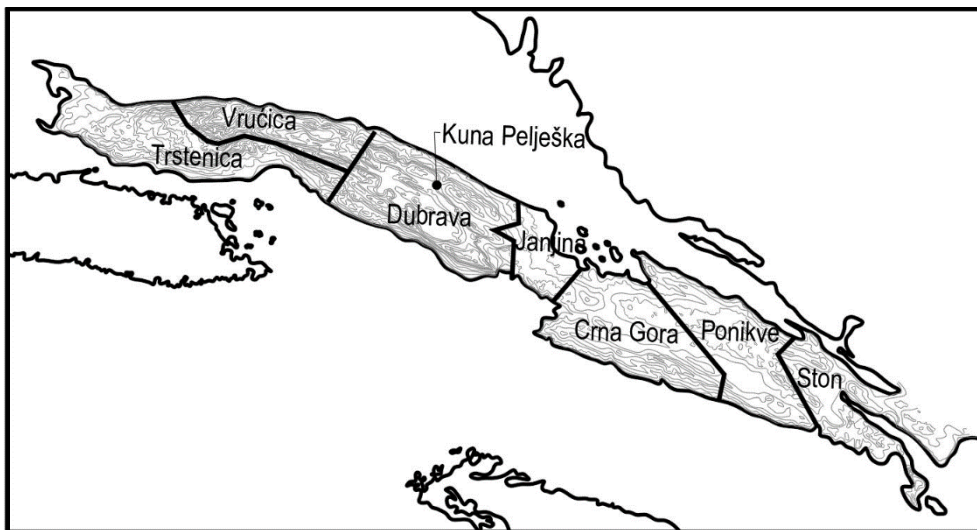
## 1. Uvod

Od 7. stoljeća Pelješac se nalazio u sklopu Zahumlja koje se prostiralo od sliva Neretve u zapadnoj Hercegovini, dijela istočne Hercegovine pa sve do Dubrovnika. Početkom 14. stoljeća Zahumljem je vladao Mladen II. koji nije imao muškog nasljednika što je uzrokovalo sukobe za vlast između bosanskog bana Stjepana II. Kotromanića i srpskog kralja Dušana iz loze Nemanjića. [1] Godine 1333. Dubrovačka je Republika iskoristila novonastali sukob i nakon pregovora otkupila poluotok od obje strane. Kupnjom Pelješca osigurala je kontrolu nad morskim prometom južnog dijela Jadrana i ušća Neretve, preuzela monopol prodaje soli te ujedno stekla vrijedna poljodjelska i stočarska zemljišta. [2]

Da bi zaštitila svoj novostečeni teritorij i odijelila se od zahumskog zaleđa, Dubrovačka Republika u 14. i 15. stoljeću počinje s izgradnjom fortifikacijskog sustava poznatijeg pod nazivom stonske zidine na istočnom dijelu poluotoka. U svojoj dužini od 7 km imaju 3 tvrđave, 41 kulu (10 okruglih i 31 četvrtastu) i 6 polukružnih bastiona. Uz brojne dogradnje, prepravke i ojačavanja, stonske su zidine do početka 19. stoljeća imale funkciju obrane. [3]

Želeći zadržati seljake (kmetove) za zemlju, Dubrovačka Republika uvodi kmetске odnose, dijeli zemljište među dubrovačkim plemstvom i počinje postupak planirane izgradnje naselja. Prva knjiga podjele dovršena je 1344. godine te nije sačuvana, ali je sačuvana knjiga revizije podjele poluotoka napravljena od 1393. do 1396. godine koja nosi titulu najstarije sačuvane zemljišne knjige na ovim područjima.

Poluotok je prvo podijeljen na tri područja koja su se, potom, dalje dijelila. Prvo područje obuhvaćalo je najveći dio poluotoka te se sastojalo od pet kontrada (Trstenica, Dubrava, Janjina, Crna Gora i Ponikve). Drugo područje odnosilo se na kontradu Ston. Treće područje obuhvaćalo je nove gradove Ston i Mali Ston (**Slika 1.**).



**Slika 1.** Podjela poluotoka Pelješca na kontrade (E. Tomelić)

Ukupno 300 dijelova (*pars, partes*) grupirano je u 30 decena. Veličina jednog dijela (*parsa*) iznosila je 11 solada ili zlatica (1 solad = 1678 m<sup>2</sup>). Svaki se dio opet dijelio na 4 četvrtine (*quarta*). Decenu je formiralo deset rodova koji su se udruživali po naklonosti, a među sobom su birali predstavnika koji je bio glavlar te decene. Teritorij je bio pravedno podijeljen. Kako sva zemlja nije bila jednako vrijedna, tako je svaka decena sadržavala dio naselja, dio obradive zemlje i dio neobradive površine. [4]

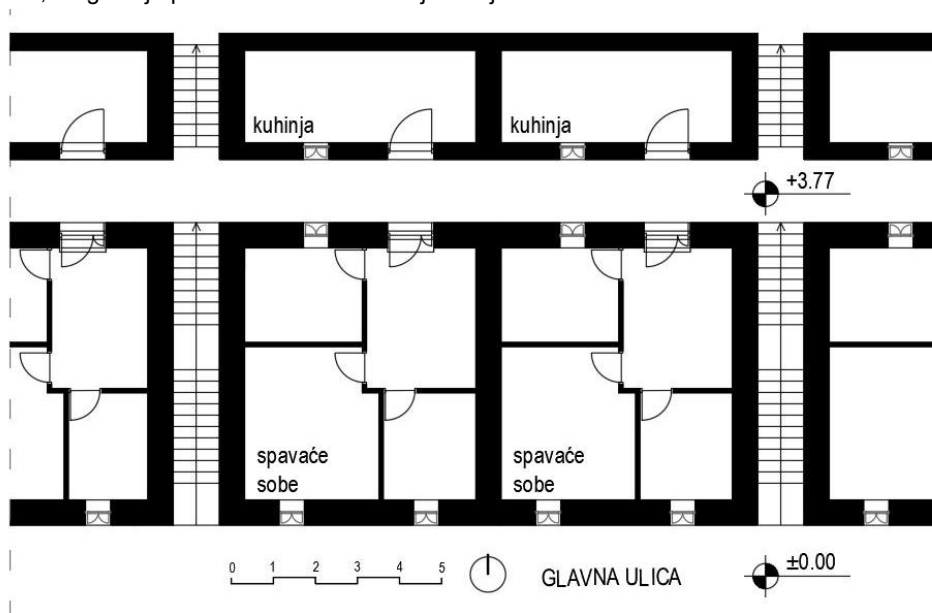
## 2. Kuna Pelješka (Slika 2.)

Na 300 m nadmorske visine, u središnjem dijelu poluotoka, smjestila se Kuna Pelješka. Naselje se nalazi jugozapadno od brda Rote i pruža se u smjeru istok-zapad. U dolini, podno naselja, nalazi se plodno polje na kojem se uglavnom uzgaja vinova loza. Sakralne građevine nalaze se izvan naselja. Samo naselje nema izravan pristup moru, već preko serpentina na sjevernoj strani poluotoka ima izlaz u luku Crkvice koja je nekad bila jedna od glavnih luka za trgovinu vinom. Kuna je jedno od najvećih naselja Kontrade Dubrava, današnje Pelješke Župe. Prvi se put spominje u spisima dubrovačkog arhiva iz 1348. godine pod imenom *Colna*. U službenim aktima nakon toga naselje nosi naziv *Cunna*, sve do druge polovice 19. stoljeća kada postaje Kuna. [5] Prema dosadašnjim istraživanjima može se zaključiti da je Kuna kao naselje postojala i prije Dubrovačke Republike.

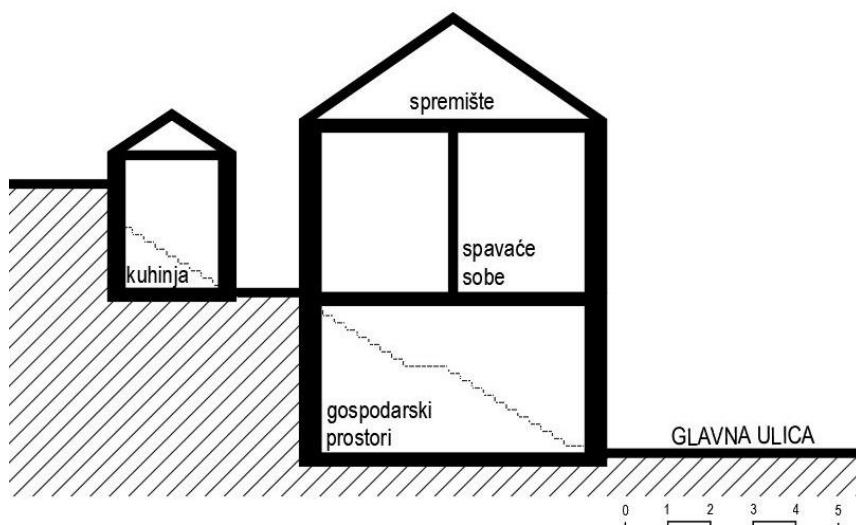


Slika 2. Kuna Pelješka (foto: Ž. Bačić)

Kuna Pelješka je u 2. svjetskom ratu pretrpjela velika razaranja. Velika većina kuća bila je spaljena, a čitavo je naselje u nekoliko navrata bombardirano. Izvorna urbanistička struktura s vremenom se izgubila zbog raznih transformacija građevina i nove izgradnje. Zahvaljujući brojnim zapisima sačuvanim u arhivima iz doba Dubrovačke Republike i Austro-Ugarske vlasti, moguće je pratiti urbanistički razvoj naselja.

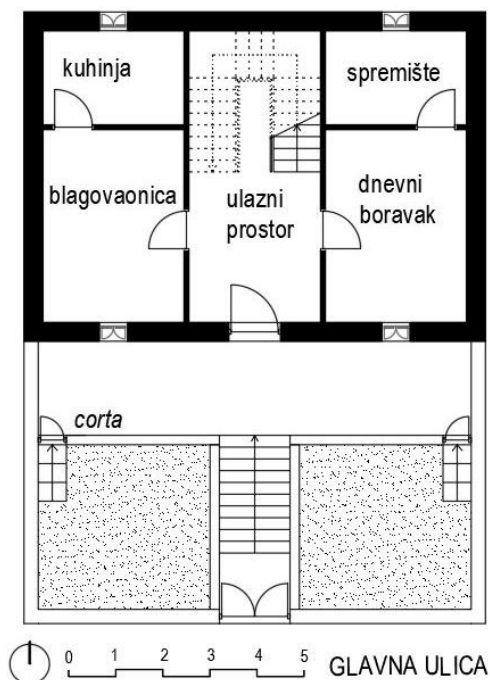


Slika 3. Shematski prikaz – Tlocrt 1. kata niza u Kuni Pelješkoj (E. Tomelić)



Slika 4. Shematski prikaz – Presjek niza u Kuni Pelješkoj (E. Tomelić)

Analizom zapisa iz arhiva i terenskim istraživanjem u šarolikoj strukturi naselja mogu se jasno iščitati dva tipa gradnje. Prvi tip čine potezi stambenih nizova. Pojavljuju se u 15. stoljeću i specifični su za doba Dubrovačke Republike. Nizovi u Kuni sastoje se od tipskih zgrada jednakih dimenzija, orijentacije i rasporeda unutarnjih prostorija. Zgrade su sagrađene na izrazito strmom terenu, a najčešće su jednokatne. U prizemljima su gospodarski prostori (obrti, trgovine, konobe) s odvojenim ulazom orijentiranim na glavnu komunikaciju kroz naselje koja se proteže u smjeru istok-zapad. Prvom se katu pristupa s gornje ulice. Do nje se dolazi preko stubišta koje je okomito postavljeno na glavnu ulicu. Na katu su spavaonice (*kamare*), dok potkrovlje služi kao spremište. Južno je pročelje raščlanjeno s dva otvora. U prizemlju su vrata i prozor, dok kat ima dva prozora. Prozori prvog kata imaju prozorske uši koje su nosile drveni štap s platnom za zaštitu od sunca. Ispod prozora nalaze se dvije konzole na koje se oslanjala daska koja se koristila za razne namjene. Kuhinje (*zognji*) su građene u zasebnom nizu. Smještene su sa sjeverne strane gornje ulice u širini glavnog objekta. Razlog tome je zaštita od požara. Staje (*košare*) odvojene su od stambenog dijela naselja kako bi se minimalizirali neugodni mirisi (**Slike 3. i 4.**).



**Slika 5.** Shematski prikaz – Tlocrt prizemlja građevina 19. stoljeća u Kuni Pelješkoj  
(E. Tomelić)

U doba Austro-Ugarske uprave, u 19. stoljeću, procvatom pomorstva i trgovine u Kuni se javlja nova tipologija stambene izgradnje. Stambene su građevine tog doba jednokatnice s reprezentativnim dvorištem (*cortom*). *Corta* se sastoji od terase ispred cijelog južnog pročelja. Zbog kosine terena zgrada i terasa su izdignute od razine ulice. Zgradi se pristupa stubištem

koje je položeno u osi građevine. S obje je strane stubišta vrt u kojem se uzgaja ukrasno bilje. Iznad stubišta i terase nalazi se pergola koja je od lagane metalne konstrukcije na kamenim stupovima, ozelenjena biljkama penjačicama (divljom lozom, bungevilijom ili ružicom). Južno je pročelje raščlanjeno s tri otvora. U prizemlju su smješteni dnevni prostori i kuhinja, dok se na prvom katu nalaze spavaće sobe i salon (**Slika 5.**). Naknadno su neke od tih kuća dograđene za jedan kat.

### **3. Zaključak**

Iako je područje Kune Pelješke u povijesno-kulturnom smislu slabije poznato, terenskim istraživanjem jasno se može iščitati kontinuirani tijekom ljudske prisutnosti na tom području od lira pa sve do danas.

Kuna je uz naselja Potomje i Pijavičino jedno od najvećih naselja Pelješke Župe. Dugi niz godina bila je kulturno, prosvjetno i vjersko središte tog dijela poluotoka. Tijekom vremena mijenjala se i prilagođavala potrebama lokalog stanovništva, ali i zahtjevima trenutne vlasti. U Kuni Pelješkoj još se uvijek može prepoznati izvorna tipologija kuća koja se vezuje za razdoblje Dubrovačke Republike. Kuće su istih dimenzija i oblikovanja, položene u nizovima. Zbog zaštite od požara kuhinje s otvorenim ognjištem nalaze se u odvojenim kućama. Reprezentativno južno pročelje stambenog niza orijentirano je prema glavnoj ulici, dok je ono prema sjeveru oblikovano skromnije. Drugi tip stambene izgradnje javlja se u 19. stoljeću u vrijeme Austro-Ugarste vlasti kada se procvatom trgovine vina povećava ekonomska moć stanovnika. Grade se raskošnije kuće koje s južne strane imaju terasu, stubište i vrt. Kuhinja je unutar građevine.

Kuna je djelomično zadržala svoj osnovni identitet poštujući plodno polje koje se pod njom prostire. Današnje zgrade ne prelaze visinu dvokatnice. Razvoj je naselja nedovoljno istražen i zahtjeva daljnja istraživanja, ali, u osnovi, možemo reći da se radi o ruralnom naselju usko vezanom za proizvodnju vina koje u nekim dijelovima ima gotovo gradski karakter.

### **Literatura**

- [1] Vekarić, N.: *Pelješka naselja u 14. stoljeću*. Dubrovnik: Zavod za povijesne znanosti Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti u Dubrovniku. pp. 11 – 12, 1989.
- [2] Nodari, M.: *Izmjene i dopune prostornog plana Dubrovačko-neretvanske županije, Povijesni pregled razvoja područja DNŽ Dubrovnik*. Dubrovnik. pp. 57, 2017.
- [3] Beritić, L.: *Stonske utvrde. Anali Zavoda za povijesne znanosti Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti u Dubrovniku*, 3, pp. 297 – 354., 1954.
- [4] Lučić, J.: *Najstarija zemljišna knjiga u Hrvatskoj – Dubrovački zemljišnik diobe zemlje u Stonu i Pelješcu iz god. 1336*. Anali Zavoda za povijesne znanosti Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti u Dubrovniku, 18, pp. 57 – 89, 1980.
- [5] Maslek, J.: *Zemlja i ljudi, vinogradarstvo na poluotoku Pelješcu u 19. i 20. stoljeću*. Zagreb – Dubrovnik: Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Zavod za povijesne znanosti u Dubrovniku, pp 44 – 47, 2016.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.07>

## PREGLED I PRIMJENA METODA OPERACIONALNE MODALNE ANALIZE U FREKVENCIJSKOJ DOMENI

Jurica Pajan<sup>1</sup>, Ivan Duvnjak<sup>2</sup>, Suzana Ereiz<sup>3</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Hrvatska, [jurica.pajan@grad.unizg.hr](mailto:jurica.pajan@grad.unizg.hr)

(2) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Hrvatska, [ivan.duvnjak@grad.unizg.hr](mailto:ivan.duvnjak@grad.unizg.hr)

(3) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Hrvatska, [suzana.ereiz@grad.unizg.hr](mailto:suzana.ereiz@grad.unizg.hr)

### Sažetak

Operacionalna modalna analiza (OMA), poznata i kao ambijentalna modalna analiza, svoj je razvoj započela 90-tih godina prošlog stoljeća. Za razliku od klasične eksperimentalne modalne analize, ne zahtijeva korištenje kontrolirane i mjerene pobude što ju čini praktičnom za korištenjem na velikim građevinskim konstrukcijama koje se zbog svoje veličine teško pobuđuju. Identifikacija modalnih parametara može se dobiti obradom prikupljenih zapisa mjerene veličine u frekvencijskom i vremenskom području, stoga se metode operacionalne modalne analize mogu podijeliti u te dvije kategorije.

U ovom radu bit će kratko opisane metode razvijene u frekvencijskom području, a razlike u određenim modalnim parametrima rasponske konstrukcije mosta bit će uspoređene za svaku od opisanih metoda.

*Ključne riječi: eksperimentalna modalna analiza, operaciona modalna analiza, dekompozicija frekventnog područja, most*

## REVIEW AND APPLICATION OF OPERATIONAL MODAL ANALYSIS METHODS IN THE FREQUENCY DOMAIN

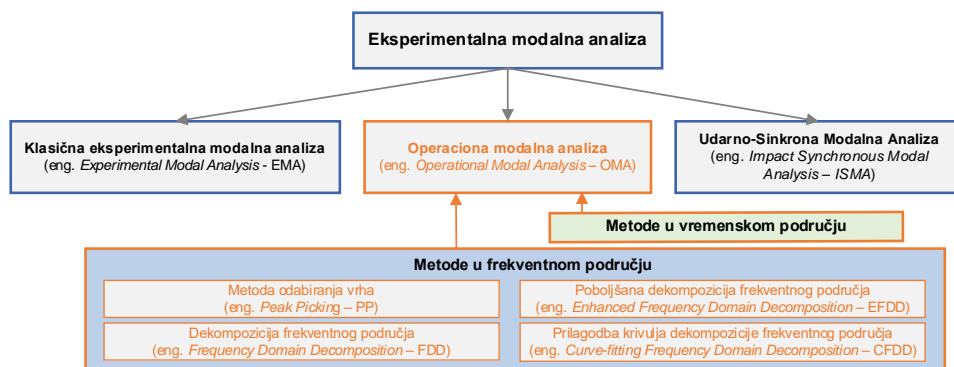
### Abstract

Operational modal analysis (OMA), also known as ambient modal analysis, started its development in the 1990s. Unlike classical experimental modal analysis, it does not require controlled and measured excitation, which makes it practical for use on large structures that are difficult to excite due to their size. Modal parameters can be identified by processing the collected records of the measured quantity in the frequency and time domains, therefore the methods of operational modal analysis can be divided into these two categories. In this paper, the methods developed in the frequency domain are briefly described, and the differences in modal parameters of a bridge superstructure are compared for each method.

*Keywords: experimental modal analysis, operational modal analysis, frequency domain decomposition, bridge*

## 1. Uvod

Modalna analiza, odnosno modalni proračun, nezaobilazan je alat za pouzdanu analizu dinamičkog ponašanja konstrukcija. Dinamičko ponašanje konstrukcije može se u potpunosti definirati s tri parametra - vlastita frekvencija, modalni oblici i prigušenje [1]. Navedeni parametri još se nazivaju modalnim parametrima, a primjenu nalaze u različitim područjima građevinarstva - od projektiranja (validacije projektirane konstrukcije [2], procjene djelovanja na konstrukciju [2, 3], kalibracije numeričkih modela [5]) do održavanja građevina (monitoring konstrukcija [5, 6]). Vlastite frekvencije i modalni oblici najčešće se određuju iz numeričkih modela konstrukcija, dok se koeficijenti prigušenja, u pravilu, određuju empirijski ili eksperimentalno. Eksperimentalno određivanje modalnih parametara konstrukcije koristeći proces korelacije dinamičkih karakteristika kroz matematički model baziran na fizikalnim svojstvima konstrukcije dobivenih iz eksperimentalnih mjerenja naziva se eksperimentalna modalna analiza.



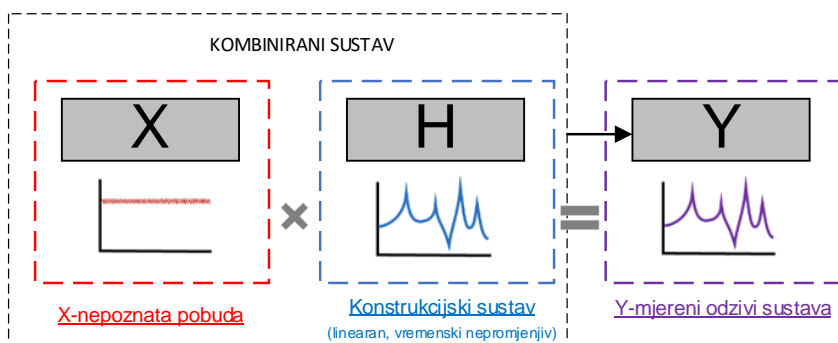
Slika 1. Metode eksperimentalne modalne analize

Operacionalna modalna analiza, kao tek jedna od metoda eksperimentalne modalne analize, ne zahtjeva poznavanje pobude što ju čini primjenjivom na građevinskim konstrukcijama. Ulazni podaci su mjereni zapisi odziva konstrukcije, a kao mjerena veličina najčešće se koriste zapisi akceleracije (mogu se koristiti i druge npr. brzine, sila...) Razvijene metode operacionalne modalne analize mogu se podijeliti ovisno o domeni u kojoj se vrši obrada podataka. Tako razlikujemo metode razvijene u frekvencijskom i vremenskom području (Slika 1). Metode razvijene u vremenskom području baziraju se na metodama stohastičke identifikacije podprostora (eng. *Stochastic Subspace Identification*, SSI), dok se metode u frekvencijskom području baziraju na dekompoziciji funkcije frekventnog odgovora. Metode u frekvencijskom području imaju nekoliko glavnih prednosti. Jedna od osnovnih je ta da je postupak analize brži i jednostavniji, a sam postupak je intuitivniji jer se pri analizi podataka koriste funkcije spektralne gustoće iz kojih se može jednostavnije razumjeti samo ponašanje konstrukcije tako da je moguća kontrola postupka u svakom koraku. Iz toga razloga u nastavku će se detaljnije obraditi samo metode za analizu podataka u frekvencijskoj domeni.

Razlike u određenim modalnim oblicima bit će prikazane na primjeru rasponske konstrukcije mosta.

## 2. Operacionalna modalna analiza

Osnovni princip operacionalne modalne analize polazi od pretpostavke da konstrukcija pobuđena širokim spektrom frekvencija filtrira nepoznatu ulaznu pobudu i u svom odgovoru dominantno oscilira pri frekvencijama koje odgovaraju njezinim vlastitim (rezonantnim). S obzirom na to da je pobuda konstrukcije nepoznata, mjereni odziv konstrukcije sadrži u sebi i karakteristike pobude – mjereni su odzivi kombiniranog sustava (konstrukcije i pobude, Slika 2.) Upravo iz tog razloga uvodi se niz pretpostavki o pobudi. Jedna od važnih pretpostavki o ulaznom signalu (pobudi) je ta da on ima karakteristiku bijelog šuma, odnosno da pobuđuje konstrukciju jednakim intenzitetom na svim frekvencijama (ravna linija u frekventnom spektru, Slika 2.) S praktičnog aspekta navedena pretpostavka opisuje pobudu koja jednakim intenzitetom pobuđuje sve modalne oblike. Prometna opterećenja, vjetar, valovi i seizmička mikro podrtavanja koja djeluju na konstrukciju prilikom redovitog korištenja (operativni uvjeti) imaju karakter sličan pretpostavljenoj pobudi bijelog šuma.

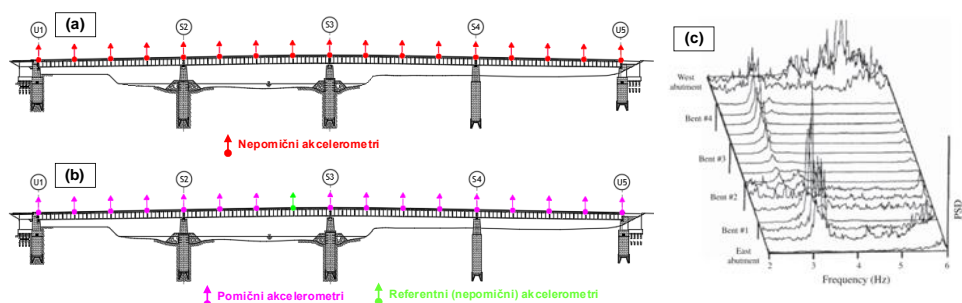


Slika 2. Shematski princip operacionalne modalne analize

Također, pretpostavlja se da je ponašanje konstrukcije linearno i vremenski nepromjenjivo [8]. Pod linearnim ponašanjem konstrukcije smatra se da je odgovor konstrukcije linearno ovisan o pobudi (linearno ponašanje) te da su modalni parametri nepromjenjivi u vremenu (za vrijeme mjerenja). Mjerenje odziva konstrukcije može se vršiti simultano (istovremeno na svim mjernim mjestima) ili na način da se senzori (akcelerometri) višestruko postavljaju na različitim mjestima na konstrukciji, no u tom slučaju potrebno je imati nekoliko fiksnih, odnosno referentnih mjesta (Slika 3.a i 3.b). Višestrukim postavljanjem možemo smanjiti broj potrebnih akcelerometara kod snimanja zapisa.

Zapisi se iz vremenske domene primjenom algoritma brze Fourierove transformacije (eng. *Fast Fourier Transform*, FFT) prebacuju u frekventijsku domenu koristeći analizator za obradu signala. Kompleksni spektar frekvencija i funkcije spektralne gustoće snage direktan su rezultat brze Fourierove transformacije. Pikovi (vršne vrijednosti) uprosječenih i normaliziranih vrijednosti spektralnih gustoća snage predstavljaju vlastite (rezonantne) frekvencije konstrukcije. Na slici 3.c. ilustriran je prikaz odabira vrhova iz zapisa spektralne gustoće snage dobivenih iz mjerenja provedenih na rasponskoj konstrukciji mosta (ukupno 5 raspona). Navedena metoda predstavlja najjednostavniji pristup u određivanju vlastitih frekvencija, a sama metoda naziva se metoda odabiranja vrha (eng. *Peak-Picking - PP*).

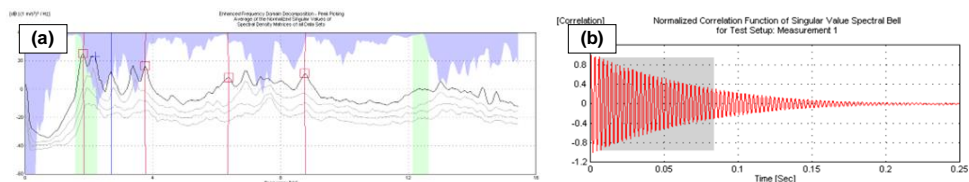




**Slika 3.** Položaj akcelerometara za operacionu modalnu analizu. (a) Istovremeno mjerenje na više mjernih mjesta, (b) Višestruko mjerenje akceleracije na različitim mjernim mjestima na konstrukciji, (c) Primjer metode odabiranja vrha (eng. *Peak – Picking method*) [9]

Kao nastavak na navedenu metodu razvijena je metoda dekompozicije frekventnog područja FDD (eng. *Frequency Domain Decomposition*). Metoda se temelji na dekompoziciji odziva konstrukcijskog sustava na niz neovisnih sustava s jednim stupnjem slobode. Teoretska podloga detaljno je raspisana u radu [10]. Prvi korak je odrediti matricu spektralnih gustoća snaga odziva konstrukcije. Članovi matrice dobivaju se prebacivanjem mjerenih vremenskih zapisa za svaki mjereni smjer i mjesto u frekvencijsku domenu, a svaki član matrice je funkcija spektralne gustoće snage (autospektralne i međuspektralne gustoće snage). Koristeći postupak dekompozicije singularnih vrijednosti SVD (eng. *Singular Value Decomposition*) matrice spektralnih gustoća snaga odziva pri nekoj diskretnoj frekvenciji  $\omega_i$ , dobivamo matricu koja sadrži singularne vektore te dijagonalnu matricu koja sadrži skalarnu singularnu vrijednost. U blizini vrha rezonancije singularni vektori su procjene modalnih oblika za pojedinu frekvenciju.

Nedostatak navedene metode je nepotpuna identifikacija modalnih parametara. Kako se za svaki određeni modalni oblik koristi samo diskretna frekvencija, nije moguće procijeniti prigušenja. Iz toga razloga razvijena je poboljšana metoda dekompozicije frekventnog područja, EFDD (eng. *Enhanced Frequency Domain Decomposition*), koja koristi singularne vrijednosti blizu vrha s pripadnim singularnim vektorom koji ima visoku vrijednost koeficijenta modalne ortogonalnosti (MAC faktora [11]). Autokorelacijska funkcija jednostupanjskog sistema se za pojedini modalni oblik, koristeći inverznu Furierovu transformaciju, prebacuje u vremensku domenu iz koje se određuju prigušenja i vlastite frekvencije korištenjem logaritamskog dekrementa.

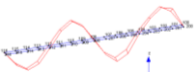
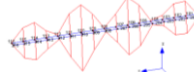
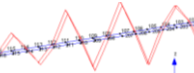
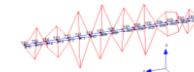


**Slika 4.** (a) Singularne vrijednosti matrice spektralnih gustoće snage odziva, (b) vremenski zapis normalizirane funkcije korelacije (za određivanje prigušenja)

Osim navedene tehnike za određivanje modalnih parametara možemo koristiti i tehniku izjednačavanja krivulja pri dekompoziciji frekventnog područja CFDD (eng. *Curve-fitting Frequency Domain Decomposition*). Ova metoda nudi veću točnost kod određivanja vlastitih frekvencija i prigušenja u slučajevima pobude koja je čistog nasumičnog (stohastičkog) karaktera ili determinističkog karaktera. Modalni parametri određuju se koristeći izjednačavanje krivulja jednostupanjskog sustava u frekventnom području, a prigušenje se određuje iz oštine rezonantnog vrha [12]. Više o samoj metodi može se pronaći u radu [13].

U nastavku su prikazani rezultati operacionalne modalne analize (Tablica 1) provedene na rasponskoj konstrukciji mosta. Radi se o spregnutoj konstrukciji preko četiri raspona. Mjerna mjesta nalazila su se u četvrtinama raspona sa svake strane mosta (na nizvodnoj i uzvodnoj strani). Akceleracija je mjerena samo u vertikalnom smjeru piezoelektričnim akcelerometrima visoke osjetljivosti (>1000 mV/g). Raspored mjernih mjesta prikazan je na Slici 4.b. Ukupno su korištena četiri akcelerometra – jedan referentni i 3 pomična koja su se pomicala duž rasponske konstrukcije. Obrada podataka provedena je koristeći prethodno spomente metode operacionalne modalne analize - FDD, EFDD i CFDD.

**Tablica 1.** Rezultati operacione modalne analize na rasponskoj konstrukciji mosta

Oblik	Opis oblika	Vlastita frekvencija [Hz]				Prigušenje [%]	
		FDD	EFDD	CFDD	sr. vr.	maks. odstupanje	EFDD
	I. vertikalni	1,813	1,842	1,859	1,838	0,025	2,444
	I. torzijski	3,750	3,761	3,792	3,768	0,024	1,202
	II. vertikalni	6,313	6,336	6,320	6,323	0,013	1,618
	II. torzijski	8,750	8,77	8,760	8,76	0,010	1,002

### 3. Diskusija i zaključak

U prethodnim poglavljima ukratko su opisane neke od metoda za obradu podataka u frekvencijskoj domeni kod operacionalne modalne analize. Modalni parametri rasponske konstrukcije spregnutog mosta određeni su primjenom svake od spomenutih metoda. S obzirom na mjereni smjer akceleracije i položaj mjernih mjesta, ukupno su određena prva četiri modalna oblika – dva vertikalna i dva torzijska. Za analizu podataka korišteni su isti vremenski zapisi akceleracije, stoga dobivene razlike u vlastitim frekvencijama ovise isključivo o korištenoj metodi za obradu podataka. Maksimalne razlike u procijenjenim vrijednostima vlastitih frekvencija za svaki eksperimentalno određeni modalni oblik iznose od 0,010 do 0,025 Hz što je neznatno odstupanje. Dakle, može zaključiti da sve metode daju jednako dobru procjenu vlastitih frekvencija. Nedostatak FDD metode je što daje samo diskretnu vrijednost vlastite frekvencije, dok EFDD i CFDD metode daju i vrijednosti moguće greške u procjeni

vlastite frekvencije. Još jedan važan nedostatak FDD metode je nemogućnost procjene prigušenja konstrukcije. Iz toga razloga preporuka je korištenje svih navedenih metoda u cilju što pouzdanije procjene modalnih parametara. Naime EFDD i CFDD metode nastale su kao proširenje osnovne FDD metode. FDD se zbog svoje računalne efikasnosti može jednostavno koristiti za evaluaciju procijenjenih modalnih oblika na samom terenu prilikom provođenja mjerenja. Na taj način mogu se pravovremeno uočiti nedostaci u snimljenim zapisima te osigurati pouzdana identifikacija modalnih parametara.

## **Literatura**

- [1] Bin Zahid, F., Ong, Z. C., Khoo, S. Y.: A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42 (8), 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02470-8.
- [2] EN 1990 Eurocode - Basis of structural design, European Committee for Standardization, 2011.
- [3] EN 1998 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, 2011.
- [4] Lopez Aenlle, M., Brincker, R., Fernandez, P., and Fernandez Canteli, A.: Load estimation from modal parameters, 2007.
- [5] Ereiz, S., Duvnjak, I., Jiménez-Alonso, F.: Review of finite element model updating methods for structural applications, *Structures*, 41, 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.05.041.
- [6] Saidin, S. S., Jamadin, A., Abdul Kudus, S., Mohd Amin, N., Anuar, M. A.: An Overview: The Application of Vibration-Based Techniques in Bridge Structural Health Monitoring, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(1), 2022, doi: 10.1186/s40069-022-00557-1.
- [7] Nguyen, V. H., Mahowald, J., Maas, S., Golinval, J. C.: Use of time- and frequency-domain approaches for damage detection in civil engineering structures, *Shock and Vibration*, 2014, doi: 10.1155/2014/872492.
- [8] Andersen P.: ARTeMIS User Training Course. pp. 1 – 152, 2023.
- [9] Felber A. J.: Development of a hybrid bridge evaluation system, 1993.
- [10] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P.: Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 2000.
- [11] Pastor, M., Binda, M., Harčarik, T.: Modal Assurance Criterion, *Procedia Engineering*, 48, pp. 543–548, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.551.
- [12] Damjanović D.: Utjecaj temperature na dinamičke parametre građevinskih konstrukcija, 2010.
- [13] Jacobsen, N. J., Andersen, P., Brincker, R.: Applications of frequency domain curve-fitting in the EFDD technique, 2008.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.14>

## ANALIZA PRIRODNIH FREKVENCIJA 2D MIKROPOLARNOG KONTINUUMA

Laura Grbac<sup>1</sup>, Gordan Jelenić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska,  
[laura.zikovic@uniri.hr](mailto:laura.zikovic@uniri.hr); [gordan.jelenic@uniri.hr](mailto:gordan.jelenic@uniri.hr)

### Sažetak

U ovome radu provedena je vibracijska analiza 2D mikropolarnog (Cosseratovog) kontinuuma na numeričkim primjerima konzolne te obostrano upete ravninske grede. Za diskretizaciju razmatranih sustava primjenjuju se novorazvijeni kvadratni izoparametarski 2D mikropolarni konačni elementi s četiri ili devet čvorova, pri čemu se za interpoliranje polja pomaka razmatraju dvije vrste interpolacijskih funkcija temeljene na konceptu nepomičnog pola (*fixed-pole* interpolacija): originalna i poboljšana (vezana interpolacija). Njihove konvergencijske krivulje za prve dvije prirodne frekvencije razmatranih numeričkih primjera uspoređuju se s rezultatima dobivenim primjenom standarde Lagrangeove interpolacije gdje poboljšana *fixed-pole* interpolacija uglavnom najbrže konvergira k točnom rješenju.

*Ključne riječi:* Cosseratova elastičnost, mikropolarni kontinuum, MKE, *fixed-pole* koncept, vezana interpolacija

## ANALYSIS OF NATURAL FREQUENCIES IN A 2D MICROPOLAR CONTINUUM

### Abstract

The vibrational analysis of a two-dimensional micropolar (Cosserats') continuum has been presented in this paper through numerical examples of a cantilever and a double-clamped planar beam. Newly developed quadrilateral 2D finite elements based on micropolar elasticity, with four or nine nodes, have been used to discretize the considered beams. Two types of *fixed-pole* interpolation have been applied to interpolate the displacement field: original and enhanced (linked interpolation). Their convergence curves for the first two natural frequencies of the analyzed numerical examples are compared with the results obtained using conventional Lagrangian interpolation, where the enhanced *fixed-pole* interpolation generally provides faster convergence.

*Keywords:* Cosserat elasticity, micropolar continuum, FEM, *fixed-pole* concept, linked interpolation

## 1. Uvod

Klasična (Cauchyjeva) teorija elastičnosti može vjerno opisati ponašanje homogenih materijala, no eksperimentalno je pokazano da to nije slučaj kod materijala s izraženijom mikrostruktuom [1] kao što je npr. pjena. Također, klasična teorija ne može obuhvatiti tzv. *size-effect* fenomen koji je uočen kod manjih uzoraka koji se ponašaju kruće od većih uzoraka istog materijala pri savijanju ili torziji [2]. Iz tog razloga su se razvile razne generalizirane teorije kontinuuma među koje spada i ovdje razmatrana **mikropolarna (Cosseratova) teorija**. U klasičnoj teoriji je statička interakcija između dvije čestice tijela opisana samo vektorom sila, dok u mikropolarnoj teoriji postoji i dodatni vektor sprega. Kao rezultat proizlazi da u mikropolarnoj teoriji postoje dva nesimetrična tenzora naprezanja, a s obzirom da postoje dodatna momentna naprezanja, također postoji i dodatna kutna deformacija (zakrivljenost) koja je definirana kao gradijent polja **mikrorotacije** [3]. Uvođenjem novog stupnja slobode mikrorotacije dajemo svakoj čestici orijentaciju. Bitno je napomenuti da je mikrorotacija potpuno neovisna o polju pomaka i makrorotaciji koja iz njega proizlazi. Kako bi se mogao u potpunosti opisati linearno-elastičan izotropan centrosimetričan mikropolarni materijal potrebno je poznavati ukupno **6 međusobno neovisnih materijalnih parametara** [4]: modul elastičnosti  $E$  i Poissonov koeficijent  $\nu$  (koji su već poznati iz klasične teorije), faktor povezanosti  $N$ , polarni omjer  $\psi$  te karakteristične duljine na savijanje  $l_b$  i torziju  $l_t$ . Glavna prepreka šire primjene teorije u praktične svrhe je nedostatak jedinstvenih i pouzdanih procedura za određivanje vrijednosti dodatnih mikropolarnih konstanti. Iz tog razloga je cilj ovog istraživanja razviti kvalitetne konačne elemente temeljene na mikropolarnoj teoriji koji će u konačnici služiti kao pouzdani simulacijski alat za određivanje mikropolarnih parametara putem inverzne numeričke analize.

## 2. Originalna i poboljšana *fixed-pole* interpolacija

Prilikom razvijanja novog konačnog elementa prema metodi pomaka za linearnu analizu mikropolarnog kontinuuma razmatramo primjenu tzv. *fixed-pole* interpolaciju koja je inspirirana konceptom nepomičnog pola (eng. *fixed-pole concept*). Koncept su prvi put predstavili Bottasso i Borri [5] gdje je primijenjen u dinamičkoj analizi geometrijskih nelinearnih 3D gređa što se pokazalo vrlo korisnim. Glavna značajka ovog koncepta je zamjena rezultante momentnog naprezanja i specifičnog momenta količine gibanja koji su u klasičnom pristupu definirani s obzirom na referentnu os gređe u poprečnom presjeku s novim rezultatama koje su definirane s obzirom na odabranu ishodišnu točku cijelog promatranog sustava (nepomičan pol). Također su uz pomoć konfiguracijskog tenzora  $C_{6D}$ , koji spada u posebnu grupu krutog gibanja  $SR(6)$  koja je ujedno i Liejeva grupa, uspjeli spojiti polje pomaka i rotacije. Na taj način je umjesto standardnog polja pomaka uvedeno novo nestandardno kinematičko polje  $\rho$ , koje objedinjuje polje pomaka  $\mathbf{u}$  i rotacije  $\phi$  s obzirom na nepomičan pol  $O$ . Implementacija koncepta pokazuje sposobnost istovremenog očuvanja energije i vektora količine gibanja te momenta količine gibanja, a može se primijeniti na elemente proizvoljnog reda.

Autori su u radu [6] predstavili primjenu *fixed-pole* interpolacije u linearnoj statičkoj analizi Timošenkove gređe (1D mikropolarni kontinuum) i 3D mikropolarnog kontinuuma [7]. Kod

greda je pokazano da se primjenom lineariziranog oblika *fixed-pole* interpolacije u konačnici dobije matrica krutosti koja je jednaka onoj koju bismo dobili uz primjenu Lagrangeove interpolacije, a za koju znamo da će nas dovesti do *shear-locking* problema ukoliko se ne primijeni reducirana numerička integracija. U svrhu poboljšanja provedena je opsežna analiza i usporedba s drugim srodnim interpolacijama te je u obogaćenom dijelu interpoliranog polja pomaka uveden koeficijent  $m$  koji predstavlja broj čvorova pojedinog konačnog elementa duž koordinatne osi, a koji je proizašao upravo iz usporedbe s vezanom interpolacijom za koju je poznato da daje točna rješenja Timošenkove grede za proizvoljno polinomno opterećenje sa dovoljnim brojem čvorova. Na taj način dobivamo poboljšanu *fixed-pole* interpolaciju za interpoliranje polja pomaka za proizvoljni broj čvorova [7]

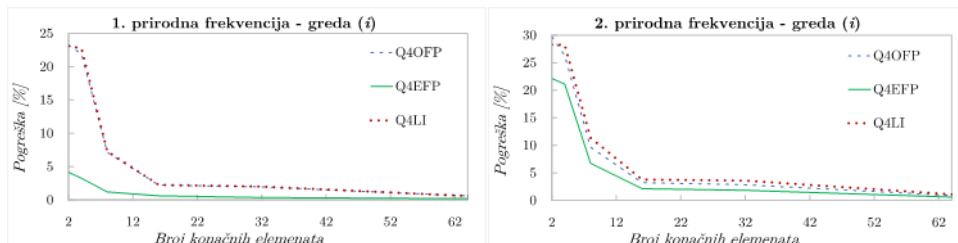
$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^m N_i \left( \boldsymbol{\rho}_i - \frac{1}{m} \widehat{\mathbf{r}}_0 \boldsymbol{\phi} \right), \quad (1)$$

dok se polje mikrorotacije interpolira standardnom Lagrangeovom interpolacijom. U izrazu (1)  $N_i$  predstavlja Lagrangeove polinome  $m - 1$  reda,  $\mathbf{r}_0 = \sum_{i=1}^m N_i \mathbf{r}_{0,i}$  je početni vektor položaja referentne osi duž grede s obzirom na promatrano ishodište, dok „hat“ operator ( $\widehat{\cdot}$ ) predstavlja antisimetričnu matricu koja zamjenjuje vektorski produkt na način da vrijedi  $\boldsymbol{\phi} \times \mathbf{r}_0 = \widehat{\mathbf{r}}_0 \boldsymbol{\phi}$ . U statičkoj analizi ova formulacija uklanja *shear-locking* problem kod grede i generalno uvijek brže konvergira ka točnom rješenju u odnosu na Lagrangeove elemente. U vibracijskoj analizi Timošenkove grede pokazano je da i originalna *fixed-pole* interpolacija (kada je koeficijent  $m = 1$ ) ima povoljnih utjecaja kod formiranja matrice mase što dovodi do brže konvergencije prirodnih frekvencija, ali samo u slučaju dvočvornih konačnih grednih elemenata, dok kod elemenata s više čvorova to poboljšanje iščezava [6]. Motivirani dobrim svojstvima primjene poboljšane *fixed-pole* interpolacije u statičkoj analizi mikropolarnog kontinuuma [7]–[9], kao i njene originalne formulacije kod vibracijske analizi Timošenkove grede u dosadašnjem istraživanju, u nastavku se provodi analiza primjene obje vrste *fixed-pole* interpolacije kod ravninskog mikropolarnog kontinuuma.

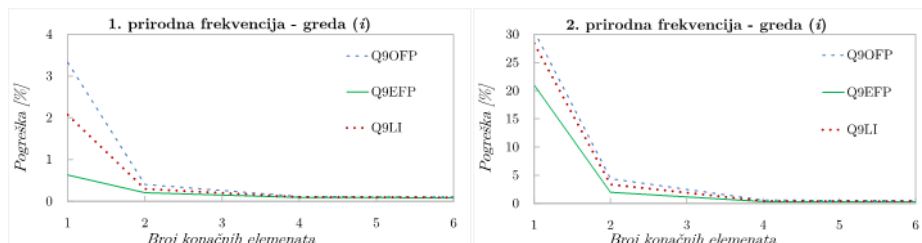
### 3. Numerički primjeri: vibracijska analiza mikropolarnog kontinuuma

Razmatra se ravninska mikropolarna greda  $L = 3.3$  mm i visine  $h = 0.165$  mm koja je u prvom slučaju jednostrano ukliještena (*i*), dok je u drugom primjeru ukliještena na oba svoja kraja (*ij*). Njene geometrijske i materijalne karakteristike definirane su kao u [10]: modul posmika  $G = 104$  MPa,  $n = 0.44$ ,  $N = 0.04$ ,  $l_b = 0.33$  mm,  $l_t = 0.62$  mm,  $\psi = 1.5$ , gustoća  $\rho = 2000$  kg/m<sup>3</sup> i materijalna mikroinercijska gustoća  $J = 10^{-1}$  kg/m. Greda je diskretizirana novorazvijenim kvadratnim mikropolarnim izoparametarskim konačnim elementima gdje su razmatrane obje vrste *fixed-pole* interpolacije za interpoliranje polja pomaka. Implementirani su u program *FEAP* (Finite Element Analysis Programme), pisan u programskom jeziku Fortran. Pojedini razvijeni elementi sadržavaju 4 (*Q4*) ili 9 (*Q9*) čvorova s po tri stupnja slobode po čvoru:  $\boldsymbol{\rho}_x$ ,  $\boldsymbol{\rho}_y$  i mikrorotacijom u ravnini  $\boldsymbol{\phi}_z$  gdje se nestandardni stupnjevi slobode  $\boldsymbol{\rho}$  mogu na vrlo jednostavan način prebaciti u standardne stupnjeve slobode  $\mathbf{u}$  poznajući izraz (1). Rezultati prvih dviju vlastitih frekvencija razmatranih numeričkih primjera ravninske grede dobiveni uz primjenu originalne *OFP* ( $m = 1$ ), poboljšane *EFF* ( $m = 2$  za *Q4* i  $m = 3$  za *Q9*) i standardne Lagrangeove interpolacije *LI* te su međusobno kritički uspoređeni, a njihove konvergencijske

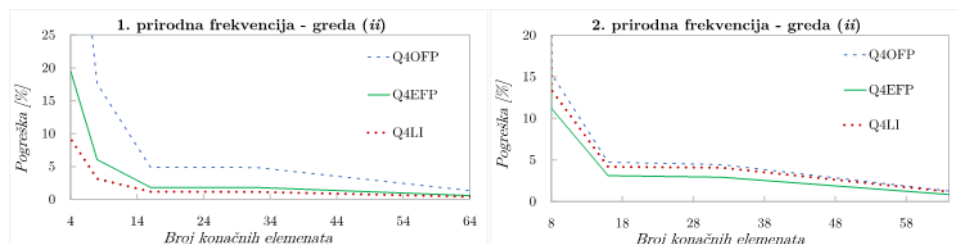
krivulje prikazane su na Slikama 1-4. Analitičko rješenje vlastitih frekvencija za razmatrane sustave nije izvedeno te je ovdje referentno rješenje dobiveno metodom konačnih elemenata na mreži od  $350 \times 25$   $L1$  elemenata, a koje za slučaj konzolne grede koincidira s numeričkim rješenjem iz literature [10].



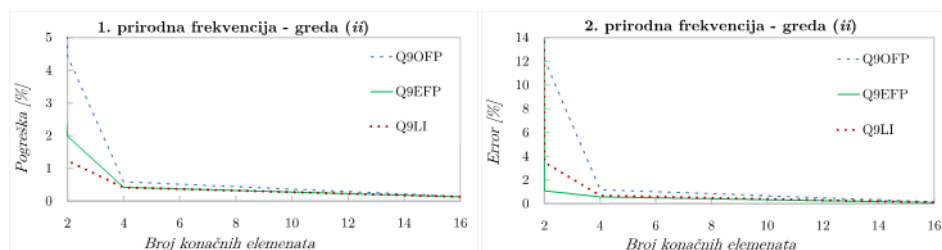
**Slika 1.** Konvergenijska studija rezultata prvih dviju prirodnih frekvencija konzolne ravninske grede ( $i$ ) diskretizirane Q4 elementima



**Slika 2.** Konvergenijska studija rezultata prvih dviju prirodnih frekvencija konzolne ravninske grede ( $i$ ) diskretizirane Q9 elementima



**Slika 3.** Konvergenijska studija rezultata prvih dviju prirodnih frekvencija obostrano upete ravninske grede ( $ii$ ) diskretizirane Q4 elementima



Slika 4. Konvergenzijska studija rezultata prvih dviju prirodnih frekvencija obostrano upete ravninske grede (ii) diskretizirane Q9 elementima

Za razliku od analize Timošenkove grede, *OFP* interpolacija ovdje ne doprinosi poboljšanju rezultata. Štoviše, daje gore rezultate nego što to daje Lagrangeova interpolacija. S druge strane *EFP* interpolacija, ipak, uglavnom pruža najtočnije rezultate kod rijetkih mreža i pokazuje najbržu konvergenciju k referentnom rješenju. Izuzetak je prva vlastita frekvencija grede (ii) kod najrjeđih mreža.

#### 4. Zaključak

U radu je primijenjena *fixed-pole* interpolacija u svom originalnom i poboljšanom obliku kod vibracijske analize 2D mikropolarnog kontinuuma. Na temelju rezultata provedenih numeričkih primjera konzolne i obostrano upete ravninske grede pokazano je da *EFP* interpolacija, uglavnom, ima najbržu konvergenciju k točnome rješenju. Više detalja o formulaciji *Q4EFP* i *Q4EFP* elemenata kao i dodatne numeričke primjere može se pronaći u [11].

#### Zahvale

Prezentirano istraživanje je financirala Hrvatska zaklada za znanost u sklopu rada na projektu (HRZZ-IP-2018-1732 i HRZZ-DOK-2018-09-8806) te je dodatno materijalno podržano potporom Sveučilišta u Rijeci uniri-tehnic-18-248 1415.

#### Literatura

- [1] Nowacki, W. K.: Theory of Asymmetric Elasticity. Warszawa: Pergamon Press, 1985.
- [2] Drugan, W. J., Lakes, R. S.: Torsion of a Cosserat elastic bar with square cross section: theory and experiment, Zeitschrift fur Angew. Math. und Phys., 69(2), pp. 1 –14, 2018, doi: 10.1007/s00033-018-0913-1.
- [3] Eringen, A. C.: Microcontinuum Field Theories: I. Foundations and Solids, New York: Springer Verlag, 1999, doi: 10.1007/978-1-4612-0555-5.
- [4] Lakes, R.: Physical meaning of elastic constants in Cosserat, void, and microstretch elasticity, J. Mech. Mater. Struct., 11(3), pp. 217 – 229, 2016, doi: 10.2140/jomms.2016.11.217.
- [5] Bottasso, C. L., Borri, M.: Integrating finite rotations, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 164(3–4), pp. 307 – 331, 1998, doi: 10.1016/S0045-7825(98)00031-0.
- [6] Žiković, L., Jelenić, G.: Primjena fixed - pole interpolacije u linearnoj dinamičkoj analizi



- Timošenkove grede, *Zbornik radova 11. susreta HDM-a*, pp. 369 – 375, 2021.
- [7] Grbac, L., Jelenić, G., Ribarić, D.: Hexahedral finite elements with enhanced fixed-pole interpolation for linear static and vibration analysis of 3D micropolar continuum, *Submitted*, 2023.
- [8] Žiković, L., Jelenić, G.: Fixed-pole interpolacija u linearnoj analizi mikropolarnog kontinuuma, *Zbornik radova 10. susreta susreta HDM-a*, pp. 313 – 318, 2020.
- [9] Grbčić, S., Jelenić, G., Ribarić, D.: Quadrilateral 2D linked-interpolation finite elements for micropolar continuum, *Acta Mech. Sin. Xuebao*, 35(5), pp. 1001 – 1020, 2019, doi: 10.1007/s10409-019-00870-1.
- [10] Kohansal-Vajargah, M. i sur.: Vibration analysis of two-dimensional structures using micropolar elements, *Appl. Math. Mech. (English Ed.)*, 42(7), pp. 999 – 1012, 2021, doi: 10.1007/s10483-021-2746-8.
- [11] Grbac, L.: Finite Elements for Linear Analysis of Micropolar Continuum and Relationship between Linked Interpolation and Interpolations on Lie Groups in Linear Form, doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci, 2023.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.16>

## NUMERIČKI MODEL ZA IDENTIFIKACIJU PARAMETARA MIKRO- ARMIRANOG BETONA

Tea Sulovsky<sup>1</sup>, Ivica Kožar<sup>2</sup>, Marina Plovanić<sup>3</sup>

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Hrvatska, [tea.sulovsky@uniri.hr](mailto:tea.sulovsky@uniri.hr)

(2) Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Hrvatska, [ivica.kozar@gradri.uniri.hr](mailto:ivica.kozar@gradri.uniri.hr)

(3) Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Hrvatska, [marina.plovanic@gradri.uniri.hr](mailto:marina.plovanic@gradri.uniri.hr)

### Sažetak

Određivanje parametara materijala ključno je za razumijevanje njihovih fizikalnih svojstava, poboljšanje procesa projektiranja i optimizaciju troškova. Zbog izazova mjerenja parametara betona armiranog vlaknima koriste se numerički modeli i inverzna analiza za identifikaciju parametara. U svrhu izrade jednog takvog modela provedena su laboratorijska ispitivanja, uključujući ispitivanja savojne i tlačne čvrstoće betona, na uzorcima betona bilježeći tri parametra: vertikalni pomak, pomak otvaranja pukotine i nanesenu silu. Rezultati laboratorijskih ispitivanja poslužili su kao referenca za razvoj numeričkog modela mikro-ojačanog betona koji je generirao podatke naknadno korištene kao ulazne vrijednosti za inverzni model temeljen na Levenberg-Marquardt metodi. Verifikacija modela uključivala je usporedbu rezultata s podacima dobivenim iz laboratorijskih ispitivanja.

*Ključne riječi: mikro-armirani beton, matematički model, inverzna analiza, procjena parametara*

## NUMERICAL MODEL FOR PARAMETER IDENTIFICATION OF MICRO- REINFORCED CONCRETE

### Abstract

Determining material parameters is crucial for understanding their physical properties, improving the design process, and optimizing costs. Due to the challenges of measuring parameters in fiber-reinforced concrete, numerical models and inverse analysis are employed for parameter identification. Laboratory tests, including bending and compressive strength tests, were conducted on concrete samples, recording three parameters: vertical displacement, crack mouth opening displacement, and applied force. The laboratory test results served as a reference for developing a numerical model of micro-reinforced concrete, which generated simulated data used as input for an inverse model based on the Levenberg-Marquardt method. Model verification involved comparing the results with the data obtained from the laboratory tests.

*Keywords: fiber-reinforced concrete, mathematical model, inverse analysis, parameter estimation*

## 1. Uvod

Identifikacija i kvantifikacija parametara nekog inženjerskog materijala imaju značaj u unaprijeđenu razumijevanja njegovih fizikalnih svojstava, poboljšanje metoda i postupaka upotrebe u projektiranju te optimizaciju troškova. Proces identifikacije parametara često zahtijeva mnoga laboratorijska ispitivanja koja mogu biti dugotrajna, financijski iscrpna te ponekada i nedovoljna. U slučaju mikro-armiranog betona, čija je glavna karakteristika zamjena klasične šipkaste armature malim, kratkim vlaknima, parametri koji opisuju betonsku smjesu, čelična vlakna i njihovu međusobno interakciju često su fizički nemjerljive veličine.

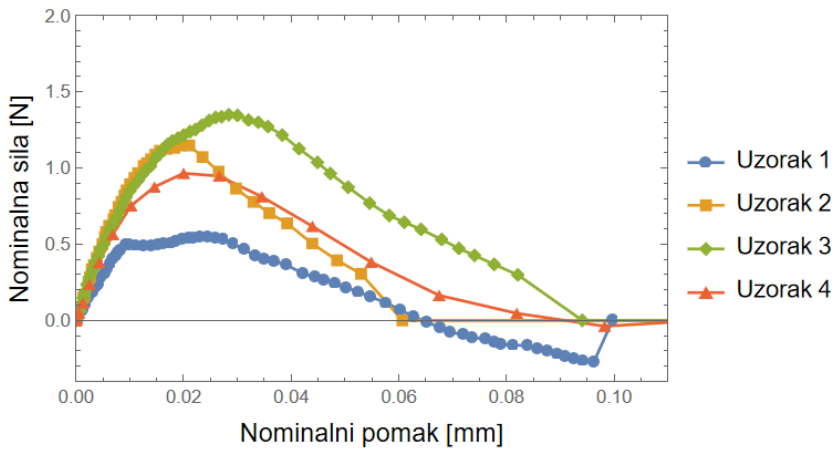
Jedna od metoda indirektnog određivanja nepoznatih veličina je korištenje računalnih modela koji mogu zamijeniti skupe eksperimentalne testove. Međutim, izuzetna heterogenost betona predstavlja značajan izazov pri opisivanju tog materijala numeričkim metodama, što se dodatno komplicira dodatkom vlakana u smjesu. U prethodnim istraživanjima korištena su dva pristupa pri rješavanju ovog problema: primjena odgovarajućeg modela konačnih elemenata gdje su vlakna diskretizirana i smještena duž rubova konačnih elemenata [1] te korištenje Modela snopova vlakana (eng. 'Fiber Bundle Model' - FBM) za kompozitne materijale [2].

U ovom radu prezentiran je novi deterministički numerički model koji inverznom analizom, temeljenom na Levenberg-Marquardtovom algoritmu, identificira materijalne parametre mikro-armiranog betona koji utječu na globalni odziv gotovog betonskog elementa.

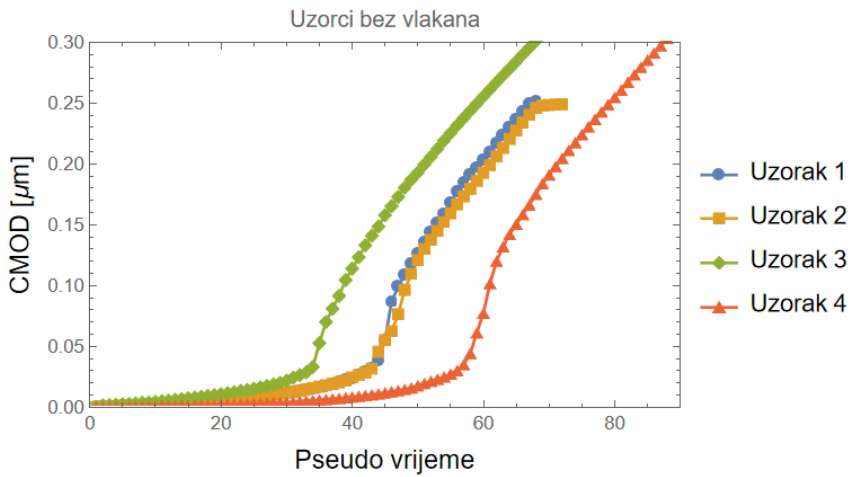
## 2. Laboratorijska ispitivanja

U svrhu dobivanja uvida u ponašanje greda izrađenih od mikro-armiranog betona provedena su laboratorijska ispitivanja. Izvršena su dva testa: savijanje greda u tri točke i ispitivanje tlačne čvrstoće kocaka. Svi ispitni uzorci izrađeni su od samoslijegajućeg betona. Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je na standardnim uzorcima betona dimenzija 150x150x150 mm nanošenjem opterećenja do sloma kocke slijedeći normu za određivanje tlačne čvrstoće ispitnih uzoraka očvrslog betona [3]. Srednja vrijednost svih mjerenja uzeta je kao referentna vrijednost tlačne čvrstoće betona.

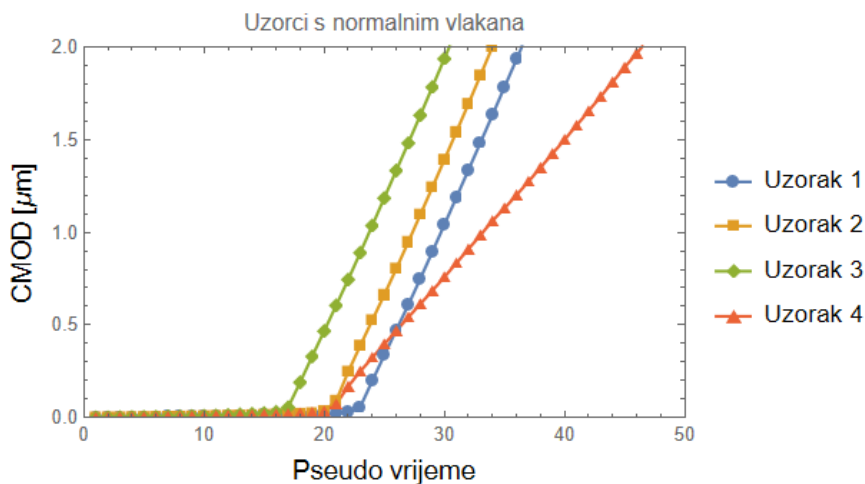
Uzorci za ispitivanje savijanjem u tri točke kategorizirani su u tri skupine: grede bez vlakna, grede s normalnim vlaknima i grede s hrapavim vlaknima. Prilikom pripreme betona armiranog vlaknima ona se obično dodaju tijekom miješanja mokrih sastojaka, što rezultira njihovom homogenom, ali nepredvidivom raspodjelom unutar gotove smjese. Kako bi se eliminirala nesigurnost pozicije vlakana unutar ispitnih uzoraka, vlakna su postavljena na predefinirane pozicije uz pomoćne elemente prije ulijevanja betonske smjese. Nakon 28 dana pomoćni elementi su uklonjeni ostavljajući „zarež“ na gredi koji predefinira poziciju pukotine i olakšava promatranje ponašanja vlakana tijekom savijanja. Sva ispitivanja provedena su uz kontrolu pomakom do sloma grede slijedeći normu za određivanje čvrstoće na savijanje uzoraka očvrslog betona [4]. Mjerene veličine uključuju: vertikalni pomak, pomak otvora pukotine (horizontalni pomak) i nanešenu silu. Rezultati ispitivanja korišteni za validaciju numeričkog modela prikazani su na Grafikonima 1. do 4.



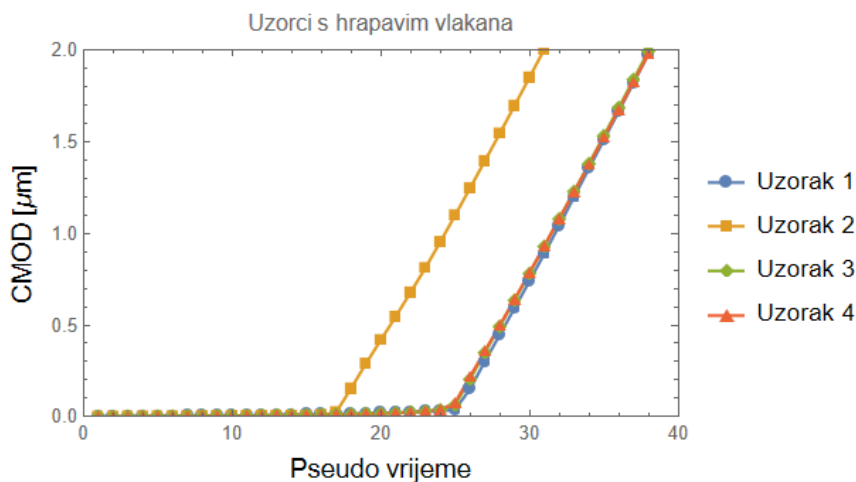
Grafikon 1. Dijagram sila-pomak betona



Grafikon 2. Horizontalni pomak otvora pukotine grede za uzorke bez vlakana



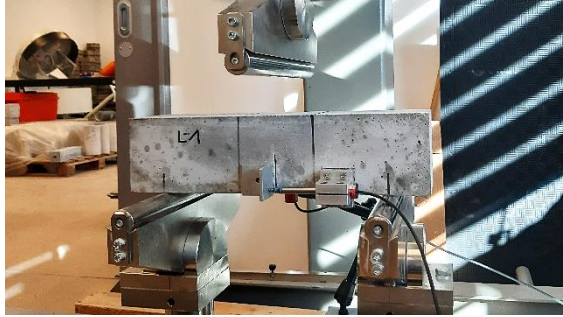
Grafikon 3. Horizontalni pomak otvora pukotine grede za uzorke s normalnim vlaknima



Grafikon 4. Horizontalni pomak otvora pukotine grede za uzorke s hrapavim vlaknima

## 2.1. Deformacija otvora pukotine

Deformacija otvora pukotine (eng. 'Crack Mouth Opening Displacement' - CMOD) je horizontalna deformacija grede pri savijanju koja se mjeri na vrhu pukotine kako je prikazano na Slici 1.



**Slika 1.** Konfiguracija testa savijanja s postavljenim mjeracem pomaka otvora pukotine CMOD je od svih rezultata dobivenih laboratorijskim ispitivanjem jedina veličina koja direktno povezuje poprečni i uzdužni presjek grede. Analizom te veličine moguće je dobiti uvid u utjecaj materijalnih parametara, kao što su oni koji opisuju vlakna u betonu, na globalni odziv grede pri opterećenju.

### 3. Matematički model mikro-armiranog betona

Beton je matematički opisan dijagramom sila-pomak:

$$f_b(x, a_t, b_t, a_c, b_c) = \begin{cases} a_c x E_b \exp(-b_c x) & \text{if } x < 0 \\ a_t x E_b \exp(-b_t x) & \text{if } x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

gdje su  $a_t$  i  $b_t$  parametri ponašanja betona u vlaknu,  $a_c$  i  $b_c$  parametri ponašanja betona u tlaku te  $E_b$  modul elastičnosti betona. Jednadžba odnosa pomaka i sile za čelična vlakna je sljedeća:

$$f_a(x, F_t, E_u, E_d) = \begin{cases} x E_b \exp(-b_c x) & \text{if } x < 0 \\ x E_u & \text{if } x > 0 \wedge x < x_{elast} \\ (x - x_{elast}) E_d & \text{if } x \geq x_{elast} \wedge x < x_{limit} \\ 0 & \text{if } x > x_{limit} \end{cases} \quad (2)$$

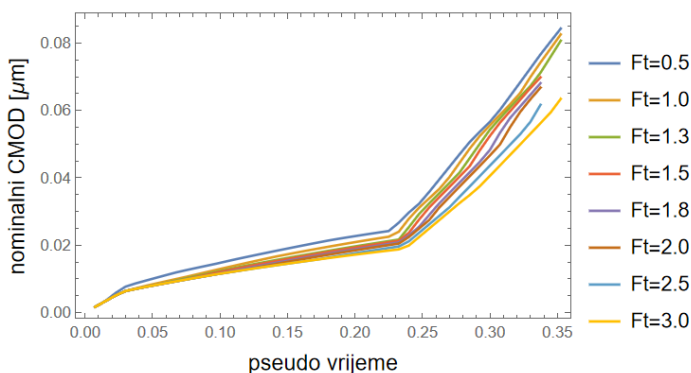
Parametri koji opisuju ponašanje vlakana su granična sila  $F_t$  te moduli elastičnosti čeličnih vlakana pri opterećenju i rasterećenju  $E_u$  i  $E_d$ . Jednadžbe materijala (1) i (2) su međusobno nezavisne, no dovode se u relaciju unutar jednadžbi ravnoteže:

$$\begin{aligned} F(\epsilon, \kappa) &= \Delta h \sum_{i=1}^{sloj} f_b[(h_i - \epsilon h) t g(\kappa)] + \Delta a f_a(h_a - \epsilon h) = 0 \\ M(\epsilon, \kappa) &= \Delta h \sum_{i=1}^{sloj} (h_i - \epsilon h) f_b[(h_i - \epsilon h) t g(\kappa)] + \Delta a (h_a - \epsilon h) f_a(h_a - \epsilon h) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

gdje gornja jednadžba predstavlja ravnotežu sila, a donja ravnotežu momenata. Iz jednadžbi ravnoteže mogu se odrediti položaj neutralne osi grede  $\epsilon$  te mjera otvora pukotine grede izražene kutom  $\kappa$ . Te dvije vrijednosti se potom koriste u izrazu za deformaciju otvora pukotine:

$$d_{cmo} = (1 - \epsilon) \cdot h \cdot t g(\kappa) \quad (4)$$

gdje  $h$  predstavlja visinu pojedinog sloja grede. Rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem izraza (4) prikazani su na Grafikonu 5.



**Grafikon 5.** Rezultati CMOD za  $E_b=40$  GPa i vrijednosti  $F_t$  od 0.5kN do 3.0kN

## 4. Inverzni model za identifikaciju parametara

Inverzni model je skup računalnih tehnika za određivanje podataka o fizičkom ponašanju u prirodi kada se pretpostavi početni uzrok pojave. Stoga, kod takvih modela izračuni započinju poznavanjem općeg načela problema koji se rješava te rezultiraju procjenama parametara ponašanja modela [5]. Inverzni model u ovom radu temelji se na metodi Levenberg-Marquardt.

### 4.1. Lavenberg-Marquardt metoda za inverznu analizu

Levenberg-Marquardt metoda je iterativna tehnika za rješavanje problema nelinearnog najmanjeg kvadrata za procjenu parametara. Ova metoda iterativno prilagođava promatrani parametar neke funkcije dok ne pronađe vrijednost koja minimizira grešku između predviđenih i stvarnih podataka.

Opći izraz za sumu kvadrata u jednadžbi koja opisuje problem prilagođavanja funkcije modela  $\hat{y}(x, p)$  nezavisnoj varijabli  $t$  i vektoru od  $n$  parametara  $p$  setu od  $m$  podataka  $(t_i, y_i)$  je:

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

gdje su  $y_i$  poznati (mjereni) podaci, a  $\hat{y}_i$  je ciljna funkcija. Ukoliko je  $\hat{y}(x, p)$  nelinearna u parametrima modela  $p$ , tada postupak minimizacije postaje iterativan.

$$\frac{\partial SS}{\partial p} = 0 \quad (6)$$

Uvrštavanjem izraza (5) u (6) dobiva se:

$$\frac{\partial SS}{\partial p} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \frac{\partial \hat{y}_i}{\partial p} \quad (7)$$

gdje je  $\frac{\partial \hat{y}_i}{\partial p}$  Jakobijska matrica dimenzija  $m \times n$  koja predstavlja lokalnu osjetljivost funkcije na varijacije vrijednosti parametara  $p$ . To se, također, naziva i koeficijentom osjetljivosti u svakoj točki mjerenja  $x_p$  te se može zapisati kao:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \chi_p = 0 \quad (8)$$

Perturbirana vrijednost parametra sa svakom iteracijom označava se s  $\Delta p$ . Ciljna funkcija od  $p + \Delta p$  se tada zapisuje kao:

$$\hat{y}_i(p + \Delta p) = \hat{y}_i(p) + \frac{\partial \hat{y}_i}{\partial p} \Delta p \quad (9)$$

Kad se (9) uvrsti natrag u (8), dobiva se:

$$\sum_{i=1}^n \left( y_i - \hat{y}_i(p) - \frac{\partial \hat{y}_i}{\partial p} \Delta p \right) \chi_p = 0 \quad (10)$$

Iz izraza (10) dobiva se vrijednost perturbacije parametra  $p$  kao:

$$\Delta p = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i(p)) \chi_p}{\sum_{i=1}^n \chi_p^2} \quad (11)$$

## 4.2. Određivanje parametara materijala $E_b$ i $F_t$

Prethodno opisana metoda primjenjuje se za određivanje vrijednosti modula elastičnosti betona  $E_b$  i granične sile čeličnog vlakna  $F_t$  te izraz (11) se zapisuje kao:

$$\Delta E_b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - d_{cmod}(E_b, F_t)) \chi_{E_b}}{\sum_{i=1}^n (\chi_{E_b})^2} \quad (12)$$

za minimizaciju po  $E_b$ , te

$$\Delta F_t = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - d_{cmod}(E_b, F_t)) \chi_{F_t}}{\sum_{i=1}^n (\chi_{F_t})^2} \quad (13)$$

za minimizaciju po  $F_t$ . Izračun započinje pretpostavljanjem početnih vrijednosti  $E_{b,0}$  i  $F_{t,0}$ . Izraz (4) koristi se kao ciljna funkcija, a koeficijenti osjetljivosti dobiveni iz izraza (8) su:

$$\chi_{E_{b,1}} = \frac{y_1 - d_{cmod}(E_{b,0}, F_{t,0})}{\Delta E_b} \quad (14)$$

za parametar  $E_b$ , tj.

$$\chi_{F_{t,1}} = \frac{y_1 - d_{cmod}(E_{b,0}, F_{t,0})}{\Delta F_t} \quad (15)$$

za parametar  $F_t$ . Sukladno tome, izrazi za perturbaciju oba parametara su sljedeći:

$$\Delta E_b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - d_{cmod}(E_{b,0}, F_{t,0})) \chi_{E_{b,1}}}{\sum_{i=1}^n \chi_{E_{b,1}}^2} \quad (16)$$

za parametar  $E_b$ , tj.

$$\Delta F_t = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - d_{cmod}(E_{b,0}, F_{t,0})) \chi_{F_{t,1}}}{\sum_{i=1}^n \chi_{F_{t,1}}^2} \quad (17)$$

za parametar  $F_t$ . Zbrajanjem početne pretpostavke s izrazima (16) i (17) za odgovarajuće parametre dobiva se konačna vrijednost iteracije.

$$F_{t,1} = F_{t,0} + \Delta F_t \quad (18)$$

$$E_{b,1} = E_{b,0} + \Delta E_b \quad (19)$$



Nakon toga se započinje nova iteracija i nastavlja se sve dok se ne pronađu vrijednosti lokalnih minimuma u kojima oba parametara konvergiraju.

Ovaj postupak se primijenio na podacima s Grafikona 1. uz vrijednost parametara  $E_b=45.0$  GPa i  $F_t=1.8$  kN. Inverznom analizom dobiveni su zadovoljavajući rezultati, pri čemu su vrijednosti tih istih parametara iznosile  $E_b=43.12$  GPa i  $F_t=1.71$  kN, uz konvergenciju unutar 20 iteracija.

## **5. Zaključak**

Proveden je izvod i opis inverznog modela za određivanje nepoznatih vrijednosti parametara materijala. Model je verificiran usporedbom rezultata s onima dobivenima laboratorijskim ispitivanjima. Daljnji rad uključivat će nadogradnju inverznog modela te analizu osjetljivosti parametara.

Zahvale: Ovaj rad je podržan projektom HRZZ 7926 "Razdvajanje utjecaja parametara u inženjerskom modeliranju s parametarskom identifikacijom" na čemu zahvaljujemo.

## **Literatura**

- [1] Smolčić, Ž., Ožbolt, J.: Mezo model betona armiranog vlaknima: Efektivna posmična veza između vlakna i betona, Zbornik radova 17(1), Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, pp.197–212, 2014, doi: <https://doi.org/10.32762/zr>
- [2] Sampson, W. W.: Modelling Stochastic Fibrous Materials with Mathematica, Engineering Materials and Processes, Springer Nature, London, 2009
- [3] Testing hardened concrete – part 3: Compressive strength of test specimens (en 12390-3:2019), 2019, doi: 10.3403/30360097U
- [4] Testing hardened concrete – part 5: Flexural strength of test specimens (en 12390-5:2019), 2019, doi: 10.3403/30360073U
- [5] Menke, W.: Geophysical data analysis: Discrete inverse theory, Academic Press, pp. 11-300, 2018 doi: 10.1016/B978-0-12-813555-6.09999-8



## VANKOMICIN REZISTENTNI *ENTEROCOCCUS FAECIUM* U PRIOBALNIM VODAMA ISTOČNOG JADRANA

Mia Dželalija<sup>1</sup>, Marija Kvesić<sup>2,3</sup>, Ana Maravić<sup>1</sup>

(1) Department of Biology, Faculty of Science, University of Split, Croatia,  
[mdzelalij@pmfst.hr](mailto:mdzelalij@pmfst.hr)

(2) Center of Excellence for Science and Technology-Integration of Mediterranean Region,  
University of Split, Croatia

(3) Doctoral study of Biophysics, Faculty of Science, University of Split, Croatia

### Sažetak

Vankomicin rezistentan *Enterococcus faecium* (VRE<sub>fm</sub>) nalazi se među najvišim globalnim prioritetima u pogledu javnog zdravstva i okoliša kao važan oportunistički patogen. Sveobuhvatnim pristupom po pitanju javnog zdravlja po prvi put smo determinirali otpornost na antibiotike, gene virulencije te pripadnost ST- grupama u VRE<sub>fm</sub> izolatima prikupljenim u priobalnim vodama. VRE<sub>fm</sub> izolati iz priobalnih voda te efluenta otpadnih voda pokazali su sličnost po pitanju gena virulencije, ST profila i gena rezistencije na antibiotike. Svi izolati su nosili gen *vanA* te aminoglikozidne gene *aph(2'')-Ib* i *aph(2'')-Id*. Gen *hyl* bio je najrašireniji gen virulencije. Izolati se nalaze u deset ST grupa koje su dio CC17 klonalnog kompleksa, glavne epidemijske grupe povezane s bolničkim infekcijama, pri čemu prevladavaju ST117 i ST889 grupe koje su zajedničke za vodene i bolničke izolate što ukazuje na njihovo širenje u okoliš putem kanalizacije.

*Ključne riječi:* VRE<sub>fm</sub>, morski okoliš, HLAR, rezistom, more, rezistencija, vankomicin

## VANCOMYCIN-RESISTANT *ENTEROCOCCUS FAECIUM* IN THE COASTAL WATERS OF THE EASTERN ADRIATIC

### Abstract

Vancomycin-resistant *Enterococcus faecium* (VRE<sub>fm</sub>) is an opportunistic pathogen among the highest global priorities regarding public and environmental health. Following the One Health approach, we determined for the first time the antibiotic resistance and virulence genes and sequence type (ST) affiliation of VRE<sub>fm</sub> recovered simultaneously from marine beach waters, the submarine outfall of a wastewater treatment plant and untreated discharge of sewage into the sea. Importantly, VRE<sub>fm</sub> recovered from wastewater and coastal bathing waters shared similar virulence, multidrug resistance and ST profiles, posing a major threat to public health. All isolates carried the *vanA* gene, aminoglycoside-resistance genes *aac(6')-Ie-aph(2'')-Ia*, and *aph(2'')-Ib* and *aph(2'')-Id*. The *hyl* gene was the most prevalent virulence gene. The isolates belonged to 10 STs of the CC17 clonal complex, a major epidemic lineage associated with hospital-acquired infections and outbreaks, with ST117 and ST889 common to waterborne and hospital isolates, suggesting their sewage-driven dissemination.

*Keywords:* VRE<sub>fm</sub>, marine environment, HLAR, resistome, seawater, vancomycine, resistance

## 1. Uvod

Najnoviji podaci o antibiotskoj rezistenciji ukazuju da su infekcije uzrokovane višestruko rezistentnim bakterijama među glavnim uzrocima smrti ljudi svih dobni skupina što je rezultiralo s ukupno 4,95 milijuna smrti u 2019. godini [1]. S obzirom na ograničeni broj učinkovitih terapijskih opcija i nedostatak novih antibakterijskih lijekova, borba protiv ovoga fenomena postaje sve izazovnije. 2017. godine Svjetska zdravstvena organizacija objavila je listu bakterija koje su prioritet za razvoj novih antibiotika, a ista je podijeljena na 3 dijela koja uključuju podjelu na: 'patogeni od kritične važnosti', 'patogeni velike važnosti' i 'patogeni srednje važnosti'. U srednjoj kategoriji, od velike važnosti, navedeni su i vankomicin-rezistentni *Enterococcus faecium* (VREfm)[2].

Enterokoki kao fekalne bakterije uključujući i VREfm, mogu dospjeti u vodeni okoliš putem otpadnih voda iz bolnica i komunalnih sustava [3,4]. Na temelju pregleda literature pronađeno je pet VREfm izolata pozitivnih na *vanA* ili *vanB* u morskoj vodi na javnim plažama i ribarskim molovima [5,6,7,8]. Važno je napomenuti da prethodne studije nisu sveobuhvatno analizirale VREfm povezujući morsko okruženje, ispuštanje otpadnih voda i bolnička okruženja kao rezervoare VREfm. Stoga smo molekularno okarakterizirali okolišne VREfm izolate dobivene istovremeno iz neobrađenih i obrađenih otpadnih voda, morske vode blizu izljeva otpadnih voda na javnoj plaži te usporedili s izolatima iz sveučilišne bolnice KBC Split. Cilj je bio prvi put testirati hipotezu da se VREfm sličnih genotipova šire u južnoj Hrvatskoj i dopijevaju u priobalne vode putem obrađenih i neobrađenih otpadnih voda.

## 2. Materijali i metode

### 2.1 Lokacije istraživanja

Studija se fokusirala na visoko urbaniziranu obalu Kaštelanskog zaljeva koja je konglomerat gradova Trogira, Kaštela, Solina i Splita s oko 350.000 stanovnika. Prva lokacija (BW: 43°32'42.1"N, 16°25'41.0"E) je javna plaža koja se nalazi u gradu Kaštela i koristi se za kupanje i druge rekreacijske svrhe, ranije identificirana kao fekalno onečišćena [9] i moćan rezervoar gram-negativnih patogena otpornih na više antibiotika [10]. Drugo mjesto uzorkovanja (SW: 43°32'41.2"N, 16°25'37.3"E) najbliži je izlaz gore spomenutoj plaži. Treća lokacija je podmorski ispust pročišćenih otpadnih voda (SB: 43°28'53.6" N, 16°31'04.3 "E), koji se nalazi na dubini od 37 m u Bračkom kanalu. Uzorkovanje i fizikalno-kemijska analiza otpadnih voda s ovog lokaliteta provedena je u sklopu našeg prethodnog istraživanja [15]. Svi uzorci vode prikupljeni su u tri primjerka. Voda s plaže (BW) prikupljena je 1 m od obale i otprilike 20 cm ispod površine u sterilne boce od boro silikatnog stakla od 1 L. Nepročišćena otpadna voda (SW) uzorkovana je približno 50 cm od obalnog ispusta i 20 cm ispod površine mora. Efluent iz podmorskog kanalizacijskog ispusta Stobreč-Stupe (SB) sakupljen je pri morskom dnu uz pomoć Niskin uzorkivača. Svi uzorci su tijekom transporta pohranjeni u prijenosnom hladnjaku i analizirani unutar 4 sata.

## 2.2 Fizikalno-kemijski parametri i fekalno onečišćenje

Razina fekalnog onečišćenja na istraživanim lokacijama procijenjena je brojanjem *E. coli* (ISO 9308-1:2014) [30] i fekalnih enterokoka (ISO 7899-2:2000) [31]. Fizikalno-kemijske parametre uzoraka SB odredili su Kvesić i sur. [12]. Temperatura, salinitet i pH uzoraka BW i SW zabilježeni su ručnim YSI Pro1030 mjerачem pH i vodljivosti s pH 1002 senzorom. Koncentracije otopljenih anorganskih nutrijenata (nitrati, nitriti, amonijak i ortofosfati) te koncentracije ukupnog dušika i fosfora (nakon UV oksidacije) određene su kolorimetrijski u nefiltriranim uzorcima pomoću kolorimetra AutoAnalyzer III (Seal Analytical). Ukupni dušik (NTOT) i fosfor (PTOT) analizirani su u nefiltriranim uzorcima nakon autoklaviranja u kiseloj otopini kalijeveg persulfata na 130 °C tijekom 120 minuta [13].

## 2.3 Izolacija, identifikacija te antibiotska osjetljivost vankomicin rezistentnih sojeva

Volumeni od 100 ml filtrirani su kroz 0.45- $\mu$ m membranske filtere (Sartorius, Njemačka) te su membrane stavljene na kromogeni agar ChromID VRE (bioMerieux, Francuska) za selekciju fenotipova otpornih na vankomicin (VAN). Ploče su inkubirane aerobno na 37°C i pregledane nakon 24 h i 48 h inkubacije. Ljubičasto obojene kolonije odabrane su kao pretpostavljeni VREfm i identificirane na razini vrste korištenjem masene spektrometrije uz pomoć laserske ionizacije (MALDI-TOF, MALDI-Biotyper), (Bruker Daltonics, Bremen, Njemačka) u skladu s uputama proizvođača.

Testiranje osjetljivosti na antibiotike provedeno je metodom disk-difuzije na ampicilin (AMP, 2  $\mu$ g), gentamicin (GEN, 30  $\mu$ g), VAN (5  $\mu$ g), tetraciklin (TEC, 30  $\mu$ g), tigeciklin (TGC, 15  $\mu$ g) i linezolid (LZD, 10  $\mu$ g) prema smjernicama Europskog odbora za ispitivanje osjetljivosti na antimikrobne lijekove [14]. Fenotip visoke razine otpornosti na aminoglikozide (HLAR) definiran je ako zone inhibicije GEN diskom (30  $\mu$ g/ml) <8 mm korištenjem disk-difuzijskog testa [14].

## 2.4 Molekularna identifikacija gena rezistencije na antibiotike

Izolatima su određeni geni koji kodiraju faktore virulencije, uključujući tvar agregacije (*asa1*), citolizin (*cyIA*), enterokokni površinski protein (*esp*), želatinazu (*gelE*), protein koji veže kolagen (*ace*), antigen endokarditisa (*efaA*) i hijaluronidazu (*hyl*) korištenjem početnica i protokola za PCR koje su opisali Golob i sur. [15], kao i serin proteaze (*sprE*) prema Stępień-Pyśniak i sur. [16].

Multiplex PCR je proveden kako bi se otkrili geni koji kodiraju rezistenciju na vankomicin i aminoglikozide. Geni *vanA*, *vanB*, *vanC1* i *vanC2/C3* određeni su prema protokolu Saida i Abdelmegeeda [17], dok su geni koji kodiraju AME, uključujući *aph(3')-IIIa*, *ant(4')-Ia*, *aac(6')-Ie-aph(2'')-Ia*, *aph(2'')-Ib*, *aph(2'')-Ic* i *aph(2'')-Id* određeni kako su prethodno opisali Özdemir i Tuncer [18].

Svi izolati VREfm uključeni u ovu studiju okarakterizirani su MLST-om. Pojedinačne PCR reakcije provedene su upotrebom početnica i uvjeta koje su opisali Homan i sur. [19] kako bi detektirali sedam kućnih gena (*atpA*, *ddl*, *gdh*, *purK*, *gyd*, *adk* i *pstS*). PCR produkti su pročišćeni i sekvencirani u oba smjera korištenjem Sanger metode u MacroGen Europa servisu (Amsterdam, Nizozemska). Dobivene sekvence su poravnate pomoću alata Clustal

Omega (<https://www.ebi.ac.uk/Tools/msa/clustalo/>) i uspoređene s referentnim alelima dostupnim u PubMLST bazi podataka (<https://pubmlst.org/organisms/enterococcus-faecium>).

### 3. Rezultati

#### 3.1. Fizikalno-kemijski parametri i fekalno onečišćenje

Fizikalno-kemijski i mikrobiološki parametri vode na plaži i morske vode koja prima otpadne vode prikazani su u tablici 1. Očekivano, najveće koncentracije hranjivih tvari, kao i fekalnih indikatorskih bakterija (FIB;  $\geq 105$  CFU/100 mL), zabilježene su na SW (netretirana otpadna voda). Slijedom toga, u uzorcima s obližnje javne plaže (BW) otkriveno je fekalno onečišćenje, ali su vrijednosti FIB-a bile unutar vrijednosti definiranih za izvrsnu kakvoću mora za kupanje prema hrvatskom zakonodavstvu (Uredba o kakvoći mora za kupanje; NN 73/08).

Parameter	Unit	BW	SW	SB
<b>Microbiological</b>				
<i>E. coli</i>	CFU/100 mL	21.67	$4.1 \times 10^5$	123.9
<i>Intestinal enterococci</i>	CFU/100 mL	53.33	$1 \times 10^5$	33.33
<b>Physical</b>				
Temperature	°C	22.9	12.2	16.25
Salinity	‰	33.3	20.2	38.73
pH		8.17	7.99	8.1
<b>Chemical</b>				
NO <sub>3</sub>	µmol/L	5.81	3.03	0.07
NO <sub>2</sub>	µmol/L	0.021	3.32	0.03
N-NH <sub>4</sub>	µmol/L	0.37	135.6	0.04
PO <sub>4</sub>	µmol/L	0.085	6.2	0.05
PTOT	µmol/L	0.242	9.27	0.15
NTOT	µmol/L	11.92	174	6.29

**Tablica 1.** Fizikalno-kemijski i mikrobiološki parametri obalne vode (BW), neobrađene otpadne vode (SW) i morske vode koja prima otpadne vode uz podzemski kanalizacijski ispust UPOV-a Stobreč-Stupe (SB). Kratice: TDS, Ukupne otopljene soli; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, sulfati; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nitriti; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, nitriti; N-NH<sub>4</sub>, amonijak; NTOT, ukupan dušik; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, fosfati; PTOT, ukupni fosfor.

#### 3.2 Molekularna karakterizacija izolata i osjetljivost na antibiotike

Ukupno je izolirano 35 vankomicin (VAN) rezistentnih izolata, uključujući 4 s javne plaže (BW) i 31 iz morskih ispusta pročišćene (SB) i netretirane kanalizacije (SW). Osim prisutne rezistencije na VAN, svi izolati bili su otporni na AMP i TEC, dok su gotovo svi izolati iz okoline (34/35) bili otporni na GEN pokazujući HLAR fenotip. Gen *vanA* identificiran je u svim izolatima iz okoline. Što se tiče gena rezistencije na aminoglikozide geni *aph(2''-Ib)* i *aph(2''-Id)* bili su dominantni u izolatima iz okoliša (32/35), ali istovremeno prisutni u 19 izolata. Gen virulencije *hyl* koji kodira hijaluronidazu bio je najzastupljeniji u svim vodenim VREfm izolatima.

MLST analiza dodijelila je izolate 10 ST grupa, a sve su pripadale CC17. ST1888, ST1889 i ST1890 bili su novo identificirani ST grupe u ovoj studiji i otkriveni samo među izolatima iz morske vode koja prima otpadne vode (SW i SB). ST177 i ST889 bili su najčešći i bili su povezani s bolničkim i okolišnim VREfm, bez obzira na njihovo podrijetlo. Izolati iz vode s plaže i ispusta nepročišćenih otpadnih voda uglavnom su povezani s ove dvije ST grupe.

Gotovo polovica (15/35) izolata iz okoliša, uključujući 14 iz ispusnih otpadnih voda i 1 s plaže, pripadalo je ST117, dok je 13 izolata (9 iz otpadnih voda, 2 s plaže) pripadalo ST889.

#### 4. Diskusija

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi molekularne karakteristike rezistencije na antibiotike i virulencije VREfm-a koji postoji u otpadnim i obalnim morskim sredinama u Hrvatskoj. VREfm prikupljeni su iz vode javne plaže, podmorskog ispusta UPOV-a na 37 m dubine i iz ispusta neobrađene otpadne vode u more kako bi se procijenila epidemiološka opasnost za njihov prijenos i puteve unošenja u prirodni okoliš.

Važno je napomenuti da nedostaju studije koje su se sveobuhvatno bavile ovim rastućim zdravstvenim problemom u morskom okolišu. Samo je nekoliko studija identificiralo *van* genotip morskih VREfm izolata, što je relevantno iz epidemiološke perspektive. Geni *vanA* ili *vanB* identificirani su u VREfm iz morske vode s javnih plaža u Sjedinjenim Državama [8] i u VRE iz vode s plaža u Portoriku [20], ali izolati nisu dodatno molekularno karakterizirani.

Gen *vanA* otkriven je u svim izolatima iz okoliša. Dominacija rezistencije posredovane *vanA* u VREfm-u u skladu je sa studijama iz nekoliko drugih zemalja [21,22]. Ovaj je gen identificiran u nadzornom izolatu hematološkog bolesnika u splitskoj sveučilišnoj bolnici [28], što ukazuje na širenje ovog genotipa rezistencije u južnoj Hrvatskoj posljednjih godina. Jakovac i sur. [29] utvrdili su da u kliničkim izolatima VREfm iz Hrvatske prevladava rezistencija posredovana *vanB*, a zatim *vanA*.

Važno je napomenuti kako su izolati sadržavali gene otpornosti na aminoglikozide *aph(2'')-Ib* i *aph(2'')-Id* koji su pretežno pronađeni i u izolatima prethodno izoliranih u splitskoj sveučilišnoj bolnici, što uključuje 13 izolata (1 iz vode s plaže i 12 iz netretiranih otpadnih voda). Morski izolati su, također, nosili gen virulencije *hyl*, što dodatno ukazuje na njihovu povezanost s bolnicom. Usprkos tome, činjenica da je većina bolničkih nadzornih izolata pripadala ST117 grupi koja je, također, najzastupljenija među izolatima koji se prenose vodom (15/35) snažno sugerira da je ST117 grupa od posebne važnosti za širenje VREfm-a u Hrvatskoj. Osim toga, bolnički i vodeni izolati ST117 dijele istu virulentnost i slične gene rezistencije na antibiotike, što ukazuje na moguću neotkrivenu cirkulaciju između bolnice i prirodnog okoliša. Grupa ST117 VREfm *vanA* tipa globalno su rašireni (<https://pubmlst.org/organisms/enterococcus-faecium>) i često se otkrivaju u europskim bolnicama, kao i kolonizacijski izolati te uzročnici nozokomijalnih epidemija [21,22,23]. Otkrili su da VREfm tipa *vanA* prevladava u talijanskim bolnicama i da one uglavnom pripadaju ST78, ST80 i ST117.

Prisutnost enterokoka, čak i VRE, i povezanih gena u otpadnim vodama UPOV-a u većoj količini nego u netretiranim otpadnim vodama već je prijavljena. Naime, nekoliko je studija dokazalo da pročišćavanje otpadnih voda može čak doprinijeti obogaćivanju VRE i *vanA* [24,25] dok su VRE otkriveni u različitim fazama procesa pročišćavanja otpadnih voda što sugerira da bi ispuštanje otpadnih voda moglo biti djelomično odgovorno za širenje VRE u okoliš i dalje u širu populacijsku zajednicu [26,27].

## 5. Zaključak

Ovaj rad izvješćuje o prvoj sveobuhvatnoj studiji visokoprioritetnog patogena VREfm izdvojenog iz obalnog morskog okoliša s fokusom na otpornost na antibiotike, virulenciju i ST pripadnost kako bi se prikazala raznolikost ST i putova uvođenja visokorizičnih klonova u prirodni okoliš. Donosimo i prve podatke o raznolikosti VREfm ST u Hrvatskoj. Genotip *vanA* prevladavao je među vodenim izolatima iz ove studije naglašavajući relevantnost ST117 i ST889 grupe u cirkulaciji okolišnih VREfm izolata iste virulentnosti i sličnih svojstava otpornosti na više antibiotika koji su slični bolničkim. Ispuštanje netretirane gradske kanalizacije u more, kao i ispusti podmorskih UPOV-a, dokazuju se kao kontinuirani putevi za uvođenje nekoliko glavnih ST-ova VREfm-a povezanih sa zdravstvenom skrbi, kao i drugih patogenih i bakterijskih populacija rezistentnih na antibiotike u obalni morski okoliš uključujući vode javnih plaža testvarajući ozbiljnu opasnost za oportunističke infekcije i objektivan rizik za daljnje širenje sojeva i povezanih gena rezistencije u prirodnom okruženju.

## Literatura

- [1] Murray, C. J., Ikuta, K. S., Sharara, F., Swetschinski, L., Aguilar, G. R., Gray, A., et al., 2022. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet*, 399(10325), 629-655. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0).
- [2] WHO, 2017. Essential medicines and health products: Global priority list of antibiotic-resistant bacteria to guide research, discovery, and development of new antibiotics. Available online at: <http://www.who.int/medicines/publications/globalpriority-list-antibiotic-resistant-bacteria> (Last accessed 7th July 2021).
- [3] Ekwanzala, M.D., Dewar, J.B., Kamika, I., Momba, M.N.B., 2020. Comparative genomics of vancomycin-resistant *Enterococcus* spp. revealed common resistome determinants from hospital wastewater to aquatic environments. *Sci. Total Environ.*, 719, 137275. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137275>.
- [4] Gotkowska-Plachta, A. 2021. The Prevalence of Virulent and Multidrug-Resistant *Enterococci* in River Water and in Treated and Untreated Municipal and Hospital Wastewater. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(2), 563. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020563>.
- [5] Roberts, M.C., Soge, O.O., Giardino, M.A., Mazengia, E., Ma, G., Meschke, J.S., 2009. Vancomycin-resistant *Enterococcus* spp. in marine environments from the West Coast of the USA. *J. Appl. Microbiol.* 107(1), 300-307. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04207.x>.
- [6] Monticelli, L. S., Decembrini, F., Bergamasco, A., Caruso, G., 2019. Water quality assessment of transitional and coastal marine Sicilian waters (Italy): Ecological and epidemiological significance of multiple antimicrobial resistant *Enterococcus* spp. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 217, 173-184. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.11.021>.
- [7] de Oliveira, A.J.F.C., Pinhata, J.M.W., 2008. Antimicrobial resistance and species composition of *Enterococcus* spp. isolated from waters and sands of marine recreational beaches in Southeastern Brazil. *Water Res.*, 42(8-9), 2242-2250. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.12.002>.
- [8] Alipour, M., Hajiesmaili, R., Talebjannat, M., Yahyapour, Y., 2014. Identification and antimicrobial resistance of *Enterococcus* spp. isolated from the river and coastal waters in northern Iran. *Sci. World J.*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/287458>.

- [9] Ordulj, M., Jozić, S., Baranović, M., Krželj, M., 2022. The Effect of Precipitation on the Microbiological Quality of Bathing Water in Areas under Anthropogenic Impact. *Water*, 14(4), 527.
- [10] Maravić, A., Šamanić, I., Šprung, M., Fredotović, Ž., Ilić, N., Dragičević, J., Puizina, J., 2018. Broad-spectrum resistance of *Pseudomonas aeruginosa* from shellfish: infrequent acquisition of novel resistance mechanisms. *Environ. Monit. Assess.*, 190(2), 81. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6471-3>.
- [11] Knezić, S., Margeta, J., 2002. Integrated management of coastal sewerage systems: the case of Kaštela Bay, Croatia. *Water Resour. Manag.* 16(4), 279-305. <https://doi.org/10.1023/A:1021957308487>.
- [12] Kvesić, M., Kalinić, H., Dželalija, M., Šamanić, I., Andričević, R., Maravić, A., 2022. Microbiome and antibiotic resistance profiling in submarine effluent-receiving coastal waters in Croatia. *Environ. Pollut.*, 292, 118282. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118282>.
- [13] Mckelvie, I.D., Peat D.M.W., Worsfold, P.J., 1995. Techniques for the quantification and speciation of phosphorus in natural waters. *Anal. Proc. Incl. Anal. Comm.*, 32: 437-445.
- [14] EUCAST, 2020. The European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing. Breakpoint tables for interpretation of MICs and zone diameters. Version 10.0. <http://www.eucast.org>. (Last accessed 7th December 2020).
- [15] Golob, M., Pate, M., Kušar, D., Dermota, U., Avberšek, J., Papić, B., et al., 2019. Antimicrobial resistance and virulence genes in *Enterococcus faecium* and *Enterococcus faecalis* from humans and retail red meat. *Biomed Res. Int.*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2815279>.
- [16] Stępień-Pyśniak, D., Hauschild, T., Kosikowska, U., Dec, M., Urban-Chmiel, R., 2019. Biofilm formation capacity and presence of virulence factors among commensal *Enterococcus* spp. from wild birds. *Sci. Rep.*, 9(1), 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47602-w>.
- [17] Said, H.S., Abdelmegeed, E.S., 2019. Emergence of multidrug resistance and extensive drug resistance among enterococcal clinical isolates in Egypt. *Infect. Drug Resist.*, 12, 1113. <https://doi.org/10.2147/IDR.S189341>.
- [18] Özdemir, R., Tuncer, Y., 2020. Detection of antibiotic resistance profiles and aminoglycoside-modifying enzyme (AME) genes in high-level aminoglycoside-resistant (HLAR) enterococci isolated from raw milk and traditional cheeses in Turkey. *Mol. Biol. Rep.* 47(3), 1703-1712. <https://doi.org/10.1007/s11033-020-05262-4>.
- [19] Homan, W. L., Tribe, D., Poznanski, S., Li, M., Hogg, G., Spalburg, E., et al. (2002). Multilocus sequence typing scheme for *Enterococcus faecium*. *J. Clin. Microbiol.*, 40(6), 1963-1971. <https://doi.org/10.1128/JCM.40.6.1963-1971.2002>.
- [20] Santiago-Rodriguez, T.M., Rivera, J.I., Coradin, M., Toranzos, G.A., 2013. Antibiotic-resistance and virulence genes in *Enterococcus* isolated from tropical recreational waters. *J. Water Health*, 11(3), 387-396. <https://doi.org/10.2166/wh.2013.005>.
- [21] Freitas, A.R., Tedim, A.P., Francia, M.V., Jensen, L.B., Novais, C., Peixe, L., et al., 2016. Multilevel population genetic analysis of *vanA* and *vanB* *Enterococcus faecium* causing nosocomial outbreaks in 27 countries (1986–2012). *J. Antimicrob. Chemother.*, 71(12), 3351-3366. <https://doi.org/10.1093/jac/dkw312>.
- [22] Fioriti, S., Simoni, S., Caucci, S., Morroni, G., Ponzio, E., Coccitto, S. N., et al., 2020. Trend of clinical vancomycin-resistant enterococci isolated in a regional Italian hospital



- from 2001 to 2018. *Braz. J. Microbiol.*, 51(4), 1607-1613. <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00360-8>.
- [23] Tedim, A. P., Lanza, V. F., Manrique, M., Pareja, E., Ruiz-Garbajosa, P., Cantón, R., et al., 2017. Complete genome sequences of isolates of *Enterococcus faecium* sequence type 117, a globally disseminated multidrug-resistant clone. *Genome Announc.*, 5(13), e01553-16. <https://doi.org/10.1128/genomeA.01553-16>.
- [24] Rosenberg Goldstein, R. E., Micallef, S. A., Gibbs, S. G., George, A., Claye, E., Sapkota, A., et al., 2014. Detection of vancomycin-resistant enterococci (VRE) at four US wastewater treatment plants that provide effluent for reuse. *Sci. Total Environ.*, 466, 404-411. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.039>.
- [25] Makowska, N., Bresa, K., Koczura, R., Philips, A., Nowis, K., Mokracka, J., 2021. Urban wastewater as a conduit for pathogenic Gram-positive bacteria and genes encoding resistance to  $\beta$ -lactams and glycopeptides. *Sci. Total Environ.* 765:144176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144176>.
- [26] Guardabassi, L., & Dalsgaard, A. 2004. Occurrence, structure, and mobility of Tn 1546-like elements in environmental isolates of vancomycin-resistant enterococci. *Appl. Environ. Microbiol.* 70(2), 984-990. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.2.984-990.2004>
- [27] Caplin, J.L., Hanlon, G.W., Taylor, H.D., 2008. Presence of vancomycin and ampicillin-resistant *Enterococcus faecium* of epidemic clonal complex-17 in wastewaters from the south coast of England. *Environ. Microbiol.*, 10, 885 – 892. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01507.x>.
- [28] Goić-Barišić, I., Radić, M., Novak, A., Rubić, Ž., Boban, N., Lukšić, B., et al., 2020. Vancomycin-Resistant *Enterococcus faecium* Colonization and *Clostridium difficile* Infection in a Hematologic Patient. *Acta Clin. Croat.* 59(3), 523-528. <https://doi.org/10.20471/acc.2020.59.03.17>.
- [29] Jakovac, S., Bojić, E. F., Ibrišimović, M. A., Tutiš, B., Ostojić, M., Hukić, M., 2017. Characteristics of vancomycin-resistant *Enterococcus* strains in the West Balkans: a first report. *Microb. Drug Resist.*, 23(1), 122-126. <https://doi.org/10.1089/mdr.2015.0355>.
- [30] International Organization for Standardization, 2000. Water quality - detection and enumeration of intestinal enterococci. Part 2. Membrane filtration method. ISO 7899-2:2000. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [31] International Organization for Standardization, 2014. Water quality - detection and enumeration of *Escherichia coli* and coliform bacteria. Part 1: membrane filtration method. ISO 9308-1:2014. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.15>

## PROCJENA RUBNIH UVJETA GREDE KORIŠTENJEM METODE NAJSTRMIJEG SPUSTA

Ivica Kožar<sup>1</sup>, Marina Plovanić<sup>1</sup>, Tea Sulovsky<sup>1</sup>

(1) Građevinski fakultet u Rijeci, Hrvatska, [marina.plovanic@gradri.uniri.hr](mailto:marina.plovanic@gradri.uniri.hr)

### Sažetak

Krajnji cilj istraživanja je procjena rubnih uvjeta staklenih ploča. U ovoj fazi istraživanja razvijen je model koji procjenjuje stupanj uklještenja grede. Model se zasniva na metodi najstrmijeg spusta što je pojednostavljenije Levenberg-Marquardt metode. Model je verificiran numeričkim rezultatima grede te su nepoznati rubni uvjeti uspješno određeni. Proširenje ovog postupka na ploče zahtijeva optimizaciju u višedimenzionalnom prostoru sa svim izazovima koje sa sobom nosi.

*Ključne riječi: procjena parametara, rubni uvjeti grede, laser Doppler vibrometar*

## ESTIMATION OF BOUNDARY CONDITIONS FOR A BEAM USING THE STEEPEST DESCENT METHOD

### Abstract

The main objective of the research is the assessment of the boundary conditions of the glass panel. At this stage of research, a model that estimates the degree of restraint of a beam has been developed. The model is based on the steepest descent method, which is a simplification of the Levenberg-Marquardt method. The model is verified against the numerical beam results and the unknown boundary conditions have been successfully determined. Extending the estimation procedure will require optimization in a multidimensional space, with all the challenges that entails.

*Keywords: parameter estimation, beam boundary conditions, laser Doppler vibrometer*

## 1. Uvod

U današnje doba staklene ploče se ugrađuju u okvire upotrebom polimera čime se rubni uvjeti staklene ploče nalaze negdje između slobodno oslonjenih i upetih. Usporedbom rezultata mjerenih pomaka i numeričkih modela moguće je procijeniti rubne uvjete sa zadovoljavajućom točnošću.

Kao prvi korak u procjeni rubnih uvjeta ploče prikazana je metoda procjene rubnih uvjeta grede s različitim stupnjevima upetosti ležajeva. Parametrizacija ležajnih uvjeta omogućava uspješnu primjenu tehnika numeričkih procjena kao što je metoda naj strmijeg spusta. Predložena metoda verificirana je numeričkim primjerom.

### 1.1. Matematički model

Matematički model baziran je na diferencijalnoj jednačini grede 4. reda koja je diskretizirana. Rubni uvjeti predstavljeni su oprugama koje su integrirane u diskretiziranu matricnu jednačinu tako da krutost svake opruge leži u intervalu  $[0,1]$  gdje 0 predstavlja zglobovi ležaj, a 1 predstavlja upeti ležaj. U konačnici, matrica krutosti uključuje rubne uvjete. Posljedica ovakve formulacije je upotreba Lagrangeovih multiplikatora kako bi se uključili rubni uvjeti. Funkcija minimizacije je kombinacija izmjerenih i izračunatih podataka.

$$F(\kappa_l, \kappa_r) = \left| \frac{y_m \cdot y_r}{y_r \cdot y_r} - b \right|^a \quad (1)$$

Izraz (1) predstavlja funkciju minimizacije gdje su  $y_m$  izmjereni podaci,  $y_r$  su izračunati podaci,  $\kappa_l$  i  $\kappa_r$  su lijevi i desni rubni uvjeti grede. Parametri  $a$  i  $b$  odabrani su tako da minimizacijska funkcija ima izražen ekstrem. Vektor podataka koji se koristi u modelu ne sadrži Lagrangeove multiplikatore. Procjena parametara se zasniva na metodi naj strmijeg spusta što je pojednostavljeno Levenberg-Marquardt metode [1].

$$\Delta \mathbf{m} \approx \frac{1}{\lambda} \nabla f(\mathbf{m}) \quad (2)$$

$$\nabla f(\mathbf{m}) = 2\mathbf{J}(\mathbf{m})^T \mathbf{F}(\mathbf{m}) \quad (3)$$

Izraz (2) predstavlja matematičku formulaciju gdje je  $\nabla f(\mathbf{m})$  definiran izrazom (3) te  $\mathbf{J}(\mathbf{m})$  je Jakobijana.

### 1.2. Prikupljanje eksperimentalnih podataka

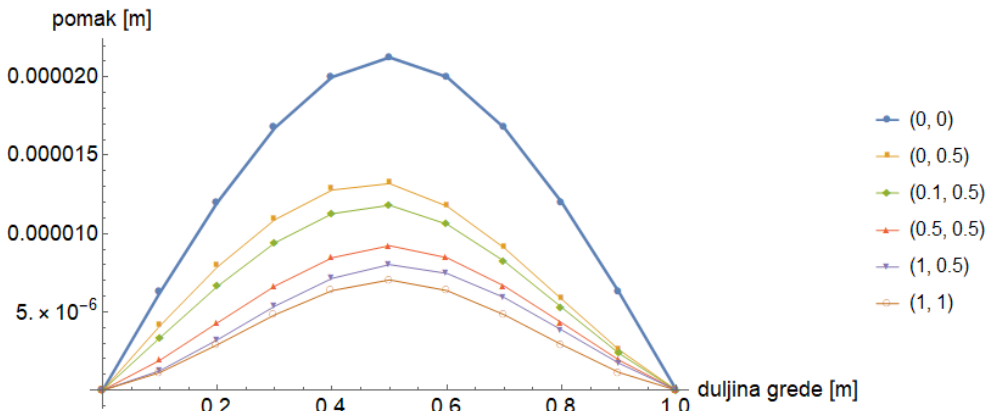
U ovoj fazi razvoja model je statički i eksperimentalni podaci koje zahtjeva su pomaci unutar konstrukcije, odnosno grede. Prikupljanje podataka vrši se pomoću laserskog Doppler vibrometra koji mjeri brzine koje je potrebno pretvoriti u pomake. Kako bismo zabilježili statičke pomake, potrebno je pratiti poziciju opterećenja, odnosno povećanje opterećenja dok ne dosegne konstantnu veličinu. Na Slici 1. prikazan je laserski uređaj korišten za prikupljanje eksperimentalnih podataka.



Slika 1. Laserski Doppler vibrometar

## 2. Verifikacija modela

Nepoznati rubni uvjeti dobiveni su inverznim modelom, odnosno modelom „prema nazad“. Ulazni podaci, odnosno svojstva grede, su:  $L=1$  m te  $EI=1000$   $\text{Nm}^2$ . Postupak dobivanja rubnih uvjeta sličan je postupcima [2] i [3].



Slika 2. Utjecaj promjene parametra uklještenja lijeve i desne strane na progib grede

Na Slici 2. prikazan je progib grede za različite parametre uklještenja, odnosno krutosti fiktivne opruge koja simulira uklještenje grede, lijeve i desne strane. Prvi broj unutar zagrade označava parametar uklještenja lijeve strane, dok drugi broj označava parametar uklještenja desne strane.

Verifikacija modela vrši se usporedbom rezultata procijenjenih parametara modela s numeričkim rezultatima modela „prema naprijed“. Osim opisane prilagođene metode najstrmijeg spusta primijenjene su metoda simuliranog žarenja i metoda nasumičnog traženja. Konvergencija rezultata ovisna o primijenjenoj metodi prikazana je u Tablici 1.

**Tablica 1.** Konvergencija rezultata ovisno o odabranoj metodi

Metoda	$K_l$	$K_r$
Simulirano žarenje	1,553	0,665
Nasumično traženje	0,963	1,038
Prilagođena metoda najstrmijeg spusta	1,000	1,000

Iz Tablice 1. vidljivo je da prilagođena metoda najstrmijeg spusta daje najbolje rezultate za određivanje rubnih uvjeta grede.

### **3. Zaključak**

Prvi korak prema procjeni rubnih uvjeta ploče je procjena rubnih uvjeta grede. Rubni su uvjeti u modelu predstavljeni oprugama koje su integrirane u diskretiziranu matičnu jednadžbu. Za navedeni pojednostavljeni problem predstavljena je metoda koja uspješno procjenjuje različite rubne uvjete grede.

### **Literatura**

- [1] Kožar, I., Torić Malić, N.: Spectral method in realistic modelling of bridges under moving vehicles, *Engineering Structures* (50), pp 149 - 157, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.10.024
- [2] Kožar, I., Torić Malić, N., Rukavina, T.: Inverse model for pullout determination of steel fibers, *Coupled Systems Mechanics* (7), pp 197 - 209, 2018, doi: 10.12989/csm.2018.7.2.197
- [3] Kožar, I., Rukavina, T., Torić Malić, N.: Similarity of structures based on matrix similarity, *Technical Gazette* (24), pp 239-246, 2017, doi: 10.17559/TV-20160208123402



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.18>

## NUMERIČKI PRORAČUNI MEĐUDJELOVANJA FLUIDA I KONSTRUKCIJE

Andro Bakica<sup>1</sup>

(1) Pomorski fakultet, Sveučilište u Splitu, Hrvatska, [abakica@pfst.hr](mailto:abakica@pfst.hr)

### Sažetak

U ovom radu prikazan je ukratko numerički pristup međudjelovanja fluida i konstrukcije. Fundamentalne razlike njihovih matematičkih modela podrazumijevaju razvijanje odvojenog modula interakcije čija je funkcija povezivanje opterećenja uzrokovanog strujanjem fluida i naprezanja u konstrukciji. Ovaj rad naglasak će staviti na dvije osnovne vrste međudjelovanja: kvazi-statičku (jednosmjernu) i dinamičku (dvosmjernu). Kvazi-statički pristup povezuje isključivo polje tlaka tj. opterećenje s modelom konstrukcije, dok dinamički pristup uzima u obzir pomak konstrukcije unutar domene fluida i samu inerciju konstrukcije. Numerički model fluida temelji se na Računalnoj Dinamici Fluida (RDF) i diskretizaciji domene metodom konačnih volumena, a programski paket korišten pri proračunu je *OpenFOAM*, programski kod otvorenog tipa (*eng. open-source*). Za model konstrukcije je korištena dobro poznata Metoda Konačnih Elemenata (MKE) koristeći programski paket NASTRAN. Poveznica između dva modela razvijena je koristeći programski jezik C++.

*Ključne riječi: Međudjelovanje fluida i konstrukcije, OpenFOAM, NASTRAN, MKE, RDF*

## NUMERICAL CALCULATIONS FOR FLUID-STRUCTURE INTERACTION

### Abstract

In this work, a numerical fluid-structure interaction model is briefly presented. Fundamental differences between their mathematical models require the development of a separate interface whose function is to connect the loads applied by the fluid flow and the stresses exhibited by the structure. This paper is focused on two main types of interactions: quasi-static (one-way) and dynamic (two-way). The quasi-static approach links the fluid pressure field, i.e. loading with the structural model, while the dynamic approach includes both the structural motions inside the fluid domain and the structural inertia. The numerical fluid model is based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) with finite volume discretization, and the software used for the study is the open-source framework OpenFOAM. For the structural model, a well-known finite element method is employed using the solver NASTRAN. The interface between the two programs is developed using the programming language C++.

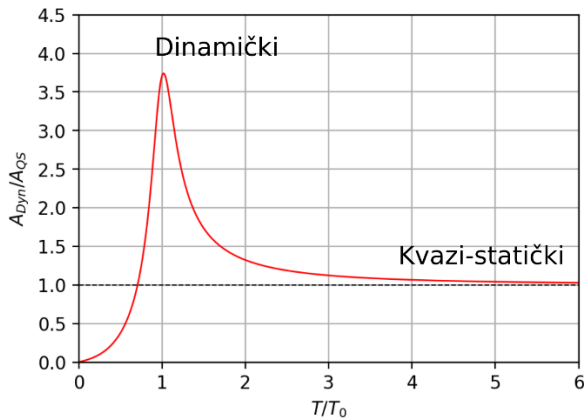
*Keywords: fluid-structure interaction, OpenFOAM, NASTRAN, FEM, CFD*

## 1. Uvod

Razvoj kompjuterskih alata doveo je do sve češćeg korištenja numeričkih metoda pri projektiranju inženjerskih konstrukcija. Zbog kompleksnosti i visoke cijene takvih proračuna njihova primjena u praksi rezervirana je samo za zahtjevne i nestandardne konstrukcije tj. inovativne i nedovoljno istražene objekte. Jedan od naprednih pristupa projektiranju su direktni proračuni međudjelovanja fluida i konstrukcije (*eng. Fluid-Structure Interaction, FSI*) kako bi se dobila realnija procjena opterećenja fluida na konstrukciju, ali i naprezanja uzrokovana tim opterećenjem. Numerički modeli potrebni za FSI proračune se u prvom redu razlikuju po složenosti pojedinačnih modela, kako strukturnog, tako i modela fluida, počevši od analitičkih formula za opterećenje fluida, preko 1D numeričkih modela konstrukcije (npr. greda za strukturni model [1]) do potpunog 3D numeričkog modela i fluida i konstrukcije koji predstavlja najveću razinu točnosti [2]. Nevezano za kompleksnost numeričkih modela fluida i konstrukcije, njihovo međudjelovanje zahtjeva razvijanje trećeg alata koji ima za svrhu povezivanje dva fundamentalno različita matematička modela. U ovom radu bit će okvirno prikazana FSI implementacija koja se temelji na 3D modelima konstrukcije i fluida. Model fluida temeljen je na diskretizaciji konačnih volumena koristeći programski paket OpenFOAM otvorenog koda [3], dok je model konstrukcije diskretiziran metodom konačnih elemenata koristeći NASTRAN. Iako je primjena u radu prikazana na pomorskim objektima, metoda je jednako upotrebljiva na bilo kojim inženjerskim konstrukcijama koje uključuju nezanemarivo opterećenje fluida (npr. mostovi, padobrani, avioni, vjetrenjače itd.).

## 2. Međudjelovanje fluida i konstrukcije

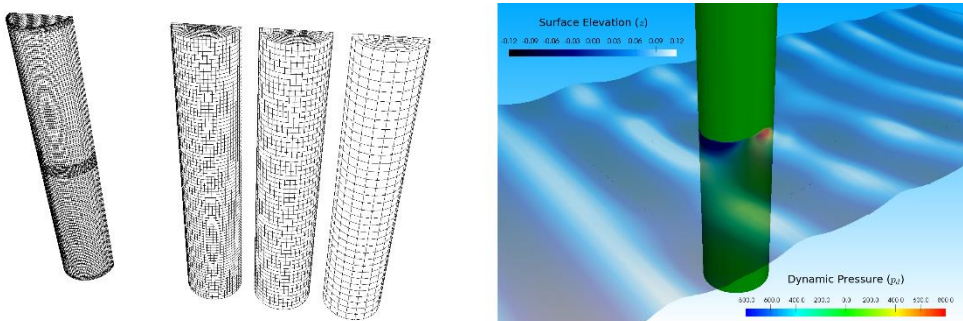
Kada promatramo bilo koji FSI problem, najvažniji čimbenik u definiranju prikladnog FSI pristupa je odnos uzbude uzrokovane opterećenjem fluida i fizikalnih svojstva konstrukcije. Time se prvenstveno misli na odnos perioda uzbude i perioda konstrukcije (prirodni period vibracija). Uobičajeni FSI pristupi koji se koriste nazivaju se: kvazi-statički (jednosmjerni) i dinamički (dvosmjerni). Kvazi-statički pristup odnosi se na interpolaciju polja tlaka s oplakane površine konstrukcije (ploha u doticaju s fluidom) na površinu strukturnog modela. Riječ „kvazi“ u suštini obilježava neovisnost sile opterećenja o pomaku konstrukcije ili, drugačije rečeno, konstrukcija ima stalan oblik u domeni fluida. S druge strane, dinamički ili dvosmjerni pristup, često nazivan aeroelastičan u polju avio industrije ili hidroelastičan u pomorskoj industriji, uzima u obzir pomak strukturnih čvorova u procesu simulacije strujanja fluida. Međutim, važno je za naglasiti da nije presudna apsolutna veličina pomaka, već je inercija konstrukcije faktor koji drastično utječe na dinamičko povećanje naprezanja, tj. kada se prirodni periodi vibracija konstrukcije nalaze u području rezonancije s periodom opterećenja. Slika 1. prikazuje odnos perioda opterećenja i prirodnog perioda konstrukcije s označenim područjima prikladnih FSI pristupa. Na slici je vidljivo da je jednak period uzbude i opterećenja kritičan u pogledu povećanja amplitude odziva te jedino za odnose perioda u blizini tog područja postoji svrha provođenja dinamičkog FSI proračuna. U suprotnom je nepotrebno provoditi dinamički proračun jer dovodi do jednakog rješenja kao i jednosmjerni kvazi-statički pristup.



Slika 1. Dinamički odziv na harmonijskom opterećenju

## 2.1. Kvazi-statičko (jednosmjerno) međudjelovanje

Cilj jednosmjernog međudjelovanja se svodi na što točniju interpolaciju tlaka s oplakane površine konstrukcije koja je u dodiru s fluidom na istu oplakanu površinu konstrukcije, ali modeliranu preko metode konačnih elemenata. Interpolacija korištena u ovom radu se temelji na metodi projekcije [4]. Kvaliteta implementirane interpolacije može se vrlo lako izračunati uspoređujući sile na strani fluida i na strani konstrukcije. Na primjeru ukliještenog cilindra primijenjena je interpolacija polja tlaka. Na Slici 2. prikazana je simulacija cilindra na valovima te oplakana površina u domeni fluida te 3 strukturne mreže na koje je opterećenje interpolirano. Prosječna greška prilikom interpolacije iznosi 0.5 %, 0.24 % i 0.22 % redom za grubu, srednju i finu mrežu konstrukcije. Važno je napomenuti da interpolacijska procedura uzima veći broj točaka po elementu kako bi se što točnije izračunale čvorne sile na strukturni model te iz tog razloga zadržava visoku točnost i na gruboj mreži konstrukcije.



Slika 2. Simulacija cilindra na valovima i oplakane površine modela fluida i konstrukcije [4]

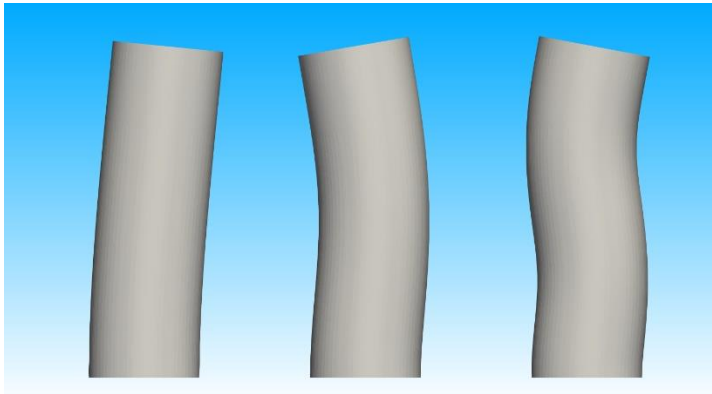


## 2.2. Dinamičko (dvosmjerno) međudjelovanje

Dvosmjerno međudjelovanje uzima u obzir inerciju konstrukcije što je ključno za određivanje dinamičkog uvećanja odziva. Postoje različite metode modeliranja dinamike konstrukcije, a u ovom radu je prikazana implementacija preko prirodnih oblika vibriranja [2]. Svojstvo ortogonalnosti omogućava razmatranje svakog prirodnog oblika vibriranja pojedinačno čime se pri određenom harmonijskom uzбудom može odvojiti dinamički utjecaj kritičnih prirodnih oblika od preostalih visoko frekventnih prirodnih vibracija koje imaju kvazi-statični odziv. Implementacija FSI dinamičkog modela provodi se u nekoliko koraka. Prvi korak je izračunavanje prirodnih oblika vibriranja u strukturnom modelu te njihova interpolacija u domenu fluida. Drugi korak je rješavanje dinamičke jednadžbe koja glasi:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}_e + \mathbf{Q}, \quad (1)$$

gdje je  $\mathbf{M}$  matrica masa,  $\mathbf{B}$  matrica prigušenja,  $\mathbf{K}$  matrica krutosti,  $\mathbf{F}_e$  generalizirani vektor vanjskih sila,  $\mathbf{Q}$  predstavlja sve kvadratne članove, a  $\mathbf{q}$  je vektor amplituda prirodnih vibracija. Navedena jednadžba (1) riješena je izravno u hidrodinamičkoj domeni kako bi se izbjegla učestala komunikacija s modelom konstrukcije. Treći korak je uz pomoć strukturnog modela očitati naprezanja nastala u konstrukciji koja odgovaraju dobivenim dinamičkim amplitudama prirodnih oblika vibriranja. Primjer prirodnih oblika vibriranja na cilindru s uklještenje prikazan na Slici 3.



**Slika 3.** Prirodni oblici vibriranja

Kada bismo cilindar prikazan na Slici 3. stavili u polje nailaznih valova i mijenjali njihov period, za prvi oblik vibriranja dobili bismo vrlo sličnu sliku kao Sliku 1. s uvjetom da bi maksimalni odziv bio na periodu koji odgovara prirodnom periodu konstrukcije. S obzirom da se radi o konstrukciji koja se nalazi djelomično pod vodom, taj period bi bio ponešto umanjen zbog utjecaja dodane mase. Osim na opterećenjima pod valovima, dinamički proračuni se nerijetko koriste za harmonijska opterećenja uzrokovana vrtlozima koji se stvaraju pri stalnoj brzini strujanja fluida.

### 3. Zaključak

U ovom radu predstavljen je općeniti prikaz međudjelovanja fluida i konstrukcije s primjerom ukliještenog cilindra. Opisane su glavne značajke jednosmjernog i dvosmjernog međudjelovanja te njihova primjena ovisno o tipu opterećenja.

### Literatura

- [1] I. Senjanović, N. Vladimir, M. Tomić, N. Hadžić, and Š. Malenica, "Global hydroelastic analysis of ultra large container ships by improved beam structural model," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 1041–1063, 2014, doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0230.
- [2] A. Bakica, Š. Malenica, N. Vladimir, and I. Senjanović, "Hydroelastic analysis of Pre-Swirl Stator," *Mar. Struct.*, vol. 85, no. June, p. 103267, 2022, doi: 10.1016/j.marstruc.2022.103267.
- [3] H. Jasak, "OpenFOAM: Open source CFD in research and industry," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 89–94, 2009.
- [4] A. Bakica, Š. Malenica, and N. Vladimir, "Hydro-structure coupling of CFD and FEM - Quasi-static approach," *Ocean Eng.*, vol. 217, 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108118.





UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.13>

## OBALNA RANJIVOST I PLAVLJENJE NASELJA KAO POSLJEDICA PODIZANJA MORSKE RAZINE

**Andrea Tadić<sup>1</sup>, Igor Ružić<sup>1</sup>, Čedomir Benac<sup>1</sup>, Nino Krvavica<sup>1</sup>, Dado  
Jakupović<sup>2</sup>, Gorana Ljubičić<sup>2</sup>, Vedrana Petrović<sup>2</sup>**

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska, [andrea.tadic@uniri.hr](mailto:andrea.tadic@uniri.hr)

(2) Javna ustanova Zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije, Hrvatska

### Sažetak

Razina mora nastavlja rasti sve većom brzinom. Predviđa se da će događaji praćeni ekstremnim razinama mora, a koji su bili povijesno rijetki, postati češći na mnogim mjestima do 2050. godine. U ovom je radu prikazana analiza obalne ranjivosti povezana s porastom razine mora provedena za obalu Primorsko-goranske županije računajući standardno korišten indeks obalne ranjivosti (CVI). CVI je prilagođen razvedenoj hrvatskoj obali i definiran preko pet reprezentativnih varijabli. Rezultati pokazuju kako je manji dio Županije ranjiv, ali da su posebno ugrožena niska naseljena područja. Stoga su se za četiri najranjivija naselja provele analize plavljenja povezane s porastom morske razine. Preduvjet za kvalitetne analize su i precizne geodetske podloge. U ovom su slučaju podloge bili trodimenzionalni oblaci točaka. Analize plavljenja pokazuju da se razina rizika razlikuje od lokacije do lokacije te da će provedba mjera adaptacije zahtijevati pojedinačan pristup svakom ranjivom području.

*Ključne riječi: adaptacija, klimatske promjene, rast morske razine, obalna ranjivost, obalno plavljenje*

## COASTAL VULNERABILITY AND FLOODING OF SETTLEMENTS DUE TO SEA LEVEL RISE

### Abstract

The sea level continues to rise at an accelerating pace. Events associated with extreme sea levels, which were rare in the past, will become more frequent in many places by 2050. This paper presents an analysis of coastal vulnerability to sea level rise conducted for the coast of Primorje-Gorski Kotar County. The commonly used Coastal Vulnerability Index (CVI) was adapted for the indented Croatian coast and defined by five representative variables. The results show that only a small part of the county is vulnerable, but that the low-lying, populated areas are particularly vulnerable. Therefore, coastal flooding analyses were also made for the four most threatened settlements. A prerequisite for high-quality analyses is accurate geodetic data. In this case, the topographic data were three-dimensional point clouds. The flooding analyses show that the risk varies from place to place and that the implementation of adaptation measures requires an individual approach for each area at risk.

*Keywords: adaptation, climate change, sea level rise, coastal vulnerability, coastal flooding*

## 1. Uvod

Porast morske razine predstavlja egzistencijalnu prijetnju za priobalne zajednice i njihovo kulturno naslijeđe. Mnogi vrijedni lokaliteti hrvatske prirodne, povijesne i kulturne baštine smješteni su u blizini morske razine (MR) te će u slučaju velikog porasta razine mora biti izloženi poplavlivanju, pa i zauvijek izgubljeni ako se ne poduzmu zaštitne mjere. Procjene rasta srednje razine mora na hrvatskoj obali u rasponu su od 0,32 m do 0,65 m do 2100. godine, pri čemu neke procjene sežu i do vrijednosti od 1,1 m [1]. Kada se na njih pribroje utjecaji povremenih ekstremnih razina mora u rasponu od 0,84 m do 1,15 m, dobivaju se ekstremne povremene razine na kraju stoljeća u rasponu od oko 1,4 m do 2,2 m. Dugoročno gledajući, porast MR-a potencijalno je jedan od najskupljih učinaka klimatskih promjena na hrvatsku obalu [2]. Stoga je tijekom 2020. izrađena *Analiza ranjivosti obalnog pojasa Primorsko-goranske županije zbog podizanja razine mora* [3]. U skladu s preporukama Protokola o integriranom upravljanju obalnim područjem Sredozemlja iz 2008. godine [4] ova će se Analiza uzimati u obzir kao stručna podloga prilikom izrade budućih izmjena i dopuna Prostornog plana Primorsko-goranske županije (PGŽ). Međutim, ocjena ranjivosti obalne linije bila je samo prvi korak prema umanjeњу negativnih posljedica podizanja razine mora. Projekt je zahtijevao i provedbu druge faze kako bi se konkretnije odredile moguće mjere zaštite što je podrazumijevalo detaljnije analize ugroženih lokacija na geodetskim podlogama centimetarske točnosti. U ovom su radu opisani osnovni rezultati ovih dviju faza projekta.

## 2. Metodologija istraživanja

### 2.1. Određivanje indeksa obalne ranjivosti

Obalna ranjivost određivala se dodjeljivanjem indeksa obalne ranjivosti (CVI, engl. *coastal vulnerability index*) [5]. Ovo je standardna metoda, ali s obzirom na karakteristike hrvatske obale, ipak je zahtijevala značajne prilagodbe. Osnovna korištena geodetska podloga bio je digitalni model terena rezolucije 25 m. Nakon prikupljanja geodetskih podloga prvi je korak bilo definiranje varijabli koje određuju obalnu ranjivost. Odabrano je njih pet: (a) geološka građa, (b) obalni nagib u odnosu na odrone i klizanja, (c) značajna visina vala, (d) obalno plavljenje, (e) postojanje žala. Ranjivost se procjenjivala na obalnoj liniji (OL) ukupne duljine 1.189 km, točkasto na svakih 25 m obalne linije. Svakom dijelu OL-a dodijeljena je vrijednost 1 – 5, najprije po svakoj pojedinoj varijabli (podindeksu), a u konačnici je izračunat i zbirni indeks obalne ranjivosti (CVI<sub>z</sub>) prema izrazu (1). Dodjeljivanje podindeksa i detaljniji metodološki okvir opisan je u objavljenoj studiji [3].

$$CVI_z = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2}{5}} \quad (1)$$

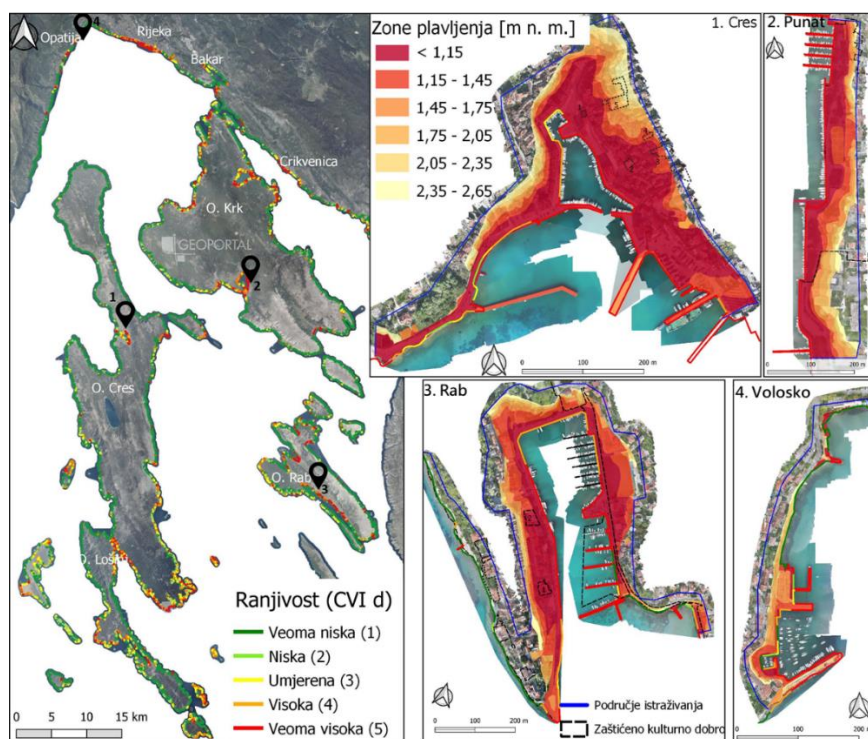
### 2.2. Analize obalnog plavljenja

Na temelju karte ranjivosti na obalno plavljenje i dostupnosti podloga odabrana su četiri naselja za detaljnije analize plavljenja, a to su Cres, Rab, Punat i Volosko (Slika 1.) Analize

plavljenja obalnih naselja za današnje i predviđeno stanje provedene su korištenjem 3D oblaka točaka i digitalnih ortofoto snimki snimljenih pomoću bespilotne letjelice (DJI Phantom 4 Advanced). Analizirano je šest scenarija razina mora, od 1,15 m n. m. (trenutna zabilježena plavljenja) do predviđenih ekstrema. U QGIS-u (v.3.16) su na temelju oblaka točaka određene veličine plavljenih površina, prostorna raspodjela relativnih dubina plavljenja, kao i ugrožena zaštićena kulturna dobra te broj ugroženih zgrada. Oblaci točaka omogućili su i simulacije djelovanja valova na plavljenim površinama što je značajan napredak u odnosu na dosadašnja istraživanja koja su bila ograničena neadekvatnom preciznošću podloga. Numeričke simulacije propagacije valova izvršene su u SWAN-u za različite MR-ove i mjerodavne vjetrove 50-godišnjeg povratnog perioda.

### 3. Rezultati

Rezultati provedenih analiza primarno su u obliku karti, a osnovne su prikazane na Slici 1. Ostatak se može pronaći unutar studije Analize ranjivosti [3].



**Slika 1.** Rezultati obalne ranjivosti PGŽ-a u odnosu na obalno plavljenje (lijevo, podloga: DOF 2020, DGU) i zone plavljenja u analiziranim naseljima

### 3.1. Obalna ranjivost

Rezultati istraživanja pokazali su izrazitu prostornu nehomogenost obalne ranjivosti PGŽ-a. Većina obale (67,4 %) niske je i veoma niske ranjivosti, dok je 13 % visoke i veoma visoke ranjivosti. Prosječna ranjivost županije je niska (2,02), ali izrazito zabrinjava ugroženost nekih područja, poput otoka Suska čija je cijela obala visoke i veoma visoke ranjivosti. Iako su rezultati zbirnog CVI-ja pokazali da je manji dio obale PGŽ-a ugrožen, negativan utjecaj pojedinih razmatranih varijabli ne smije se zanemariti. Čak 47,2 % obale određeno je visokom ili veoma visokom ranjivosti prema barem jednoj od analiziranih varijabli. Provedene analize pokazale su i da je 34,4 % obalne linije ranjivo na odrone i pojave klizišta zbog nepovoljnog obalnog nagiba. Zabrinjavajući je i podatak da je četvrtina obale (24 %) PGŽ-a visoke i veoma visoke obalne ranjivosti u odnosu na obalno plavljenje (Slika 1.). Prognoziranim rastom razine mora za 60 cm udio visoko i veoma visoko ranjive obale povećat će se na otprilike 30 %. U tom najugroženijem dijelu je većina obalnih naselja gdje su plavljenja česta već i sada.

### 3.2. Obalno plavljenje analiziranih naselja

Za četiri naselja određene su zone plavljenja u odnosu na ispitane scenarije. Karte su prikazane na Slici 1., a osnovni rezultati u Tablici 1.

Istraženi dio grada **Cresa** (1.219 m obalne linije bez uključenih obalnih građevina) u cijelosti se nalazi unutar zaštićene kulturno-povijesne cjeline upisane u Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske. Pri današnjim povišenim MR-ovima (scenarij < 1,15 m n. m.) plavi površina veličine 44.793 m<sup>2</sup>, odnosno 36,7 m<sup>2</sup> po metru obalne linije (m<sup>2</sup>/m' OL). Dubine plavljenja su pri trenutnim plavljenjima male pa ne dolazi do veće materijalne štete, ali porastom MR-a dubine plavljenja postat će opasne za ljude i građevine. Rizik će povećavati i valovi (viši od 30 cm) koji će se širiti plavljenim područjem.

**Tablica 5.** Pregled rezultata analiza plavljenja

	Scenarij	Cres	Rab	Punat	Volosko
Površina plavljenja po m' OL [m <sup>2</sup> /m']	< 1,15	36,7	17,5	31,3	2,6
	1,15 – 1,45	47,3	28,2	43,6	6,2
	1,45 – 1,75	53,2	32,0	51,2	8,8
	1,75 – 2,05	56,3	33,9	57,5	10,7
	2,05 – 2,35	59,5	35,7	62,6	12,3
	2,35 – 2,65	62,7	36,7	65,2	13,2
Dubina plavljenja [m]*	< 1,15	0,3 (0,6)	0,3 (0,6)	0,3 (0,2)	0,5
	1,15 – 1,45	0,5 (0,9)	0,4 (0,9)	0,5 (0,3)	0,4 (0,2)
	1,45 – 1,75	0,8 (>1,1)	0,6 (>1,1)	0,8 (0,6)	0,5 (0,5)

\* prva vrijednost odnosi se na medijan dubina izračunat u QGIS-u, a vrijednost u zagradi je najveća dubina plavljenja ispred zgrada za pojedini scenarij

U **Rabu** plavi slična površina kao u Cresu, ali „opterećenje“ na obalnu liniju (u dužini od 2.643 m) je oko dva puta manje (17,5 m<sup>2</sup>/m' OL). More u prosjeku zadire 35 m prema kopnu, a na zapadnoj obali luke plave i ulice smještene 64 m od obale. Veliki dio plavljene površine (80,7 – 89,6 %) nalazi se unutar Registrom zaštićene kulturno-povijesne cjeline grada Raba. I ovdje osnovni problem predstavljaju velike dubine plavljenja. Podizanjem MR-a povećat će se dubine plavljenja, a na plavljenim površinama javit će se valovi viši od 15 cm što će dodatno ometati funkcioniranje prometne infrastrukture, obalnih građevina te kanalizacijskog sustava. Plavljenje **Punta** slične je veličine kao u Cresu (Tablica 1.), ali ovdje su rizici vezani uz obalno plavljenje višestruko manji zbog početnog odmaka izgradnje od obalne linije. Istraženo je 919 m obalne linije Punta, a priobalno je područje većim dijelom (oko 75 %) zaštićeno kulturno dobro. Predviđenim podizanjem razine mora zanemarivo će se povećati površine plavljenja zbog povoljnih nagiba terena, a osnovni problem će i ovdje predstavljati povećanje dubina plavljenja i širenje valova. S današnjim plavljenjima valovi dosežu značajnu visinu od 10 cm na udaljenosti od 20-ak m od OL-a. Međutim, valovi se šire neizgrađenim javnim površinama i ne dosežu zgrade. Tek s porastom MR-a na 1,75 m n. m. do zgrada će stizati viši valovi (oko 20 cm).

Rezultati analiza plavljenja provedenih za 764 m obalne linije u **Voloskom** pokazuju da plavi uglavnom južni dio naselja gdje je ugroženo nekoliko zgrada (Slika 1.) Osnovni problem ovdje predstavlja plavljenje lukobrana te zapljuskivanje valova na sjevernom dijelu naselja što uvelike ugrožava sigurnost prometa već i pri prvom scenariju. Cijelo područje je, također, zaštićeno kulturno dobro što treba uzeti u obzir prilikom donošenja adaptacijskih mjera.

#### **4. Diskusija**

Obalni reljef istraživanog područja veoma je složen. Obalna linija je razvedena, složene geološke građe i obalne morfologije zbog čega provedene analize ranjivosti obalnog područja u odnosu na obalni nagib treba sagledati u skladu s korištenim mjerilom. Problem mjerila u provedenim analizama najviše se odražava kroz slabu vertikalnu preciznost i veliki razmak između točaka DEM-a (25 m) na često veoma strmom terenu. To može utjecati na preciznost provedenih analiza, pogotovo ako se rezultati analize obalne ranjivosti projiciraju i na područje iza obalne linije, odnosno definiranje granice plavljenja obalnog područja za određene scenarije podizanja razine mora. Iz ovog razloga rezultati analize ranjivosti koriste se za identifikaciju potencijalno ranjivih područja PGŽ-a. Detaljnije analize provedene u drugoj fazi za Cres, Rab, Punat i Volosko potvrdile su zaključke prethodnih istraživanja iz prve faze projekta. Pokazano je i da dio postojeće obalne infrastrukture (lukobrani, obale) u većini istraživanih naselja već danas nije funkcionalan tijekom ekstremno visokih razina mora. Takvu infrastrukturu potrebno je prilikom redovnog održavanja i sanacija prilagoditi trenutnom i predviđenom djelovanju mora te očekivanim ekstremnim MR-ovima. Ovim istraživanjem pokazalo se da je kvalitetna analiza plavljenja osnovni preduvjet za razvoj metoda adaptacije i konkretnih rješenja zaštite, a primarni cilj ovakvih studija je primjena rezultata upravo za potrebe integralnog upravljanja obalnim područjem i provođenje aktivnosti za održivo ublažavanje plavljenja u budućnosti. Također, najveća zabilježena morska razina od 1,15 m n. m. definirana je rekonstrukcijom razine plavljenja na osnovu opažanja lokalnog stanovništva, zbog čega su moguća određena odstupanja od stvarnih vrijednosti. Za potrebe



točnijih procjena morskih razina stoga se preporučuje i povećanje broja mareografskih postaja na području PGŽ-a. Mjerenje MR-a s visokom točnošću i vremenskom rezolucijom ključno je za monitoring i analizu hazarda tijekom ekstremnih vodostaja, kao i za planiranje obalnog prostora i uspostavu sustava ranog upozoravanja.

## **5. Zaključak**

Razvijena je metodologija analize obalne ranjivosti koja je prilagođena specifičnostima razvedene i geološki nehomogene obale istočnog Jadrana. Obalna ranjivost definirana je uz pomoć standardno korištenog indeksa obalne ranjivosti koji se sastoji od više parcijalnih indeksa (podindeksa): geološke građe, obalnog nagiba, djelovanja valova, plavljenja obale i žala. Definirana je nova formula kojom su se objedinila djelovanja ovih varijabli, a kojom se naglasio povoljan učinak koji žala imaju na sveukupnu ranjivost obale. Ovo je i jedna od rijetkih studija koja je razmatrala utjecaj odrona koji se na našoj obali često dešavaju. Ranjivost obalnog pojasa PGŽ-a zbog podizanja MR-a većinom je povoljna, ali se pokazalo da su najugroženija područja upravo ona naseljena. Nastavak istraživanja podrazumijevao je provedbu analiza plavljenja ugroženih naselja: Cresa, Raba, Punta i Voloskog formiranih još u srednjem vijeku. S obzirom da su to tipična priobalna naselja RH, velika je mogućnost primjene razvijene metodologije.

Analize plavljenja temeljene su na produktima daljinskih istraživanja – trodimenzionalnim oblacima točaka koji su danas već postali standard geodetskih snimanja. Oblaci točaka omogućili su provođenje preciznih analiza površina i dubina plavljenja za različite scenarije podizanja MR-a i rizika povezanih s njihovim pojedinačnim ili zbirnim djelovanjem. Primjena opisane metodologije omogućuje tako precizno zoniranje i stupnjevanje rizika, što je osnovni preduvjet (podloga) za definiranje politike adaptacije pojedinog naselja. Projektima prilagodbe treba pristupiti planski i multidisciplinarno, a presudna će biti koordinacija između upravljačkih tijela i prostornih planera.

## **Literatura**

- [1] Republika Hrvatska: Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_04\\_46\\_921.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_04_46_921.html), 06.07.2023.
- [2] Branković, Č., Bray, J., Callaway, J., Dulčić, J., Gajić-Čapka, M., Glamuzina, B., Heim, I., Japec, L., Kalinski, V., Landau, S., Legro, S., OIKON, Ltd, Ortl, F., Patarčić, M., Srnec, L., Šimleša, D., Zaninović, K., Znaor, D.: Dobra klima za promjene, Klimatske promjene i njihove posljedice na društvo i gospodarstvo u Hrvatskoj, UNDP, 2009
- [3] Ružić, I., Benac, Č., Tadić, A., Krvavica, N., Petrović, V., Ljubičić, G., Jakupović, D.: Analiza ranjivosti obalnog pojasa Primorsko-goranske županije zbog podizanja razine mora, JU Zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije, 2022
- [4] Europska unija: Protocol on Integrated Coastal Zone Management in the Mediterranean, 2009
- [5] Gornitz, V.: Global coastal hazards from future sea level rise, *Global and Planetary Change*, 3(4), pp. 379–398, 1991, doi: 10.1016/0921-8181(91)



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.23>

## ASPEKTI KVALITETE DOBROVOLJNIH GEOINFORMACIJA U KRIZNIM SITUACIJAMA

Marina Tavra<sup>1,2</sup>

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

[mtavra@gradst.hr](mailto:mtavra@gradst.hr)

(2) Sveučilište u Ljubljani, Fakultet građevinarstva i geodezije, Slovenija

### Sažetak

Sve veća učestalost katastrofa diljem svijeta dovela je do povećanja primijenjenih istraživanja u službi razvoja tehnologija za podršku procesima donošenja odluka u kriznim situacijama. Učinkovito upravljanje katastrofama ovisi o dostupnosti ažurnih i točnih podataka, a pojava dobrovoljnih geoinformacija (engl. *Volunteered Geographic Information* - VGI) otvorila je mogućnosti za prikupljanje podataka gotovo u stvarnom vremenu. VGI proizvode različiti dionici koristeći različite tehnologije i alate, a svaki pruža podatke s različitim razinama točnosti. Osim toga, sami dionici imaju širok raspon metoda procjene kvalitete i pristupa donošenju odluka što otežava tumačenje njihovih doprinosa. Ovaj pregled, stoga, ima za cilj pomno ispitati istraživačku literaturu u području VGI-a u kontekstu upravljanja katastrofama usredotočujući se na dimenzije kvalitete VGI-a koje obuhvaćaju i aspekte osiguranja, i procjene kvalitete podataka.

*Ključne riječi: nabava iz mnoštva, VGI, katastrofa, kvaliteta prostornih podataka*

## QUALITY ASPECTS OF VOLUNTEERED GEOGRAPHIC INFORMATION IN CRISIS SITUATIONS

### Abstract

The escalation of disasters around the world has led to an increase in applied research in the service of developing technologies that support decision-making processes in crisis situations. Effective disaster management depends on the availability of up-to-date and accurate data, and the advent of Volunteered Geographic Information (VGI) has opened up opportunities for near-real-time data collection. VGI is produced by different stakeholders using different technologies and tools, each providing data with different levels of granularity and accuracy. In addition, the stakeholders themselves have a wide range of quality assessment methods and decision-making approaches, making it difficult to interpret their contributions. This review therefore aims to closely examine the research literature in the field of VGI in the context of disaster management, focusing on the quality dimensions of VGI that encompass both quality assurance and assessment aspects.

*Keywords: crowdsourcing, VGI, disaster, spatial data quality*

## 1. Uvod

Dobrovoljne geoinformacije (engl. *Volunteered Geographic Information – VGI*) su geoinformacije prikupljene putem dobrovoljnih napora pojedinaca ili zajednica, dijeljene s ciljem pružanja saznanja o geografskom okruženju [1].

Razvoj tehnologija učinio je običnom građanstvu dostupnim različite pametne uređaje koji imaju ugrađene sustave za pozicioniranje uz različite senzore [2]. Društveni mediji su postali popularna platforma za korisnike koji žele podijeliti informacije s geografskim oznakama (georeferencirane podatke) tijekom kriznih situacija. Osim lokacije na kojoj je događaj ili objekt zabilježen, korisnici mogu objaviti informacije u različitim formatima: slikama, audio ili video zapisima te raznim mjerenjima [3].

U kriznim situacijama poput prirodnih katastrofa i nepogoda (potresa, oluja, poplava, požara itd.) ili događaja uzrokovanih ljudskim djelovanjem (ekološki incidenti, terorizam, industrijske nesreće itd.) tradicionalni izvori podataka mogu pružiti kvalitetnu podršku u odlučivanju, no možda neće pravodobno pružiti ažurne ili obuhvatne podatke. VGI popunjava ovu prazninu dopuštajući građanima, volonterima i pogođenim zajednicama da doprinesu svojim lokalnim znanjem, zapažanjima i podacima putem različitih online platformi, mobilnih aplikacija i kanala društvenih medija [4], [5].

Koncept VGI nudi vrijednu perspektivu za obogaćivanje geoinformacija, pogotovo u slučajevima kriznih situacija gdje obično prevladava visoka motiviranost pojedinaca [6]. Budući da te podatke „proizvode“ uglavnom laici, postoje izazovi povezani s kvalitetom isporučenih podataka [7].

Različite razine tehničkih sposobnosti sudionika, kao i ljudski čimbenici poput subjektivnosti ili osviještenosti o situaciji (engl. *situational awareness*) u prostoru, mogu rezultirati netočnim podacima, podacima smanjene preciznosti ili pogrešnim interpretacijama. Nedostatak jasnoće u metodologijama prikupljanja i analize, također, može dovesti do nesigurnosti u vezi s kvalitetom podataka [8]. U kontekstu kvalitete podataka kod VGI možemo razdvojiti dva aspekta iz perspektive aktivnosti u upravljanju kriznim situacijama: osiguranje kvalitete (engl. *quality assurance*) i procjena kvalitete (engl. *quality assessment*). Osiguranje i procjena kvalitete odnose se na postupke i strategije koje se primjenjuju kako bi se osigurala i evaluirala pouzdanost, točnost i dosljednost prikupljenih geografskih informacija putem dobrovoljnog sudjelovanja pojedinaca ili zajednica. Procjena kvalitete se bavi evaluacijom već prikupljenih podataka [9], dok osiguranje kvalitete obuhvaća aktivnosti koje se provode kako bi se kvaliteta podataka osigurala tijekom cijelog procesa prikupljanja podataka [10].

S obzirom na ove izazove, važno je razviti i primijeniti pravilne metode provjere i validacije kako bi se procijenila pouzdanost VGI podataka. Integracija VGI podataka s profesionalnim izvorima i primjena odgovarajućih alata za ocjenu kvalitete, vodeći računa o namjeni podataka, može pomoći u umanjivanju problema vezanih uz točnost i dosljednost informacija. Pažljiva procjena kvalitete ključna je kako bi se osigurala valjanost VGI podataka u kriznim situacijama te kako bi se oni ispravno iskoristili za informiranje i odlučivanje, ali i za analizu i istraživanje.

## **2. Poboljšanje kvalitete VGI**

Osiguranje kvalitete dobrovoljnih geoinformacija odnosi se na niz aktivnosti koje se provode kako bi se osigurala visoka kvaliteta podataka tijekom cijelog procesa prikupljanja podataka u sklopu VGI [10]. Ovaj aspekt kvalitete posebno je zahtjevan u kontekstu kriznih situacija, zbog nepredvidive pojavnosti događaja.

Osiguranje kvalitete VGI u slučajevima nepogoda ili katastrofa iziskuje suradnju relevantnih dionika zaduženih za upravljanje katastrofama, od političara do terenskih operativaca. Brzi razvoj tehnologije, osim na mogućnosti uspostava pouzdanih sustava i dostupnosti podataka, također utječe i na ponašanje i percepciju. Nepredvidivost katastrofa može se ublažiti ako imamo dostupne korisne i pravovremene geoinformacije koje se mogu postići kroz integraciju sa službenih podacima [11], razvoj tehnoloških alata i aplikacija [12] te protokole i podatkovne okvire za prikupljanje podataka [13].

### **2.1. Integracija VGI u službene podatke**

Kankanamge i dr. 2020. [11] na primjeru objava na platformi Twitter tijekom poplava u South East Queenslandu 2010. – 2011. pokazali su učinkovitost korištenja podataka društvenih mreža u upravljanju katastrofama i određivanju ozbiljnosti katastrofe analizom podataka pomoću integracije podataka s drugim izvorima, proširenjem uspostavljenog okvira za analizu podataka i identificiranjem visoko pogođenih područja katastrofe prema percepciji lokalnih zajednica.

Aktivna suradnja između svih relevantnih dionika, uključujući vlasti, stručnjake, volontere i lokalnu zajednicu, osigurava koordinirane napore i razmjenu informacija. Ovaj multidisciplinarni pristup osigurava potrebnu stručnost i raznolike perspektive kako bi se osigurala visoka kvaliteta VGI, posebno u kriznim situacijama [14]. Integracija službenih izvora s VGI-om može pridonijeti boljem razumijevanju situacije te omogućiti validaciju i provjeru prikupljenih informacija u kasnijoj procjeni podataka od strane stručnjaka.

### **2.2. Razvoj tehnoloških alata i aplikacija**

Postoji mnoštvo aplikacija za slučajeve katastrofa koje rade na principima VGI. Jedna od poznatijih je LastQuake [15]. Aplikacija LastQuake Europske mediteranske seizmičke agencije omogućava brzo širenje informacija o potresima i pruža dodatne izvore podataka koji mogu pomoći u donošenju odluka i reagiranju na krizne situacije. VGI princip omogućava širenje informacija o lokaciji uz dodatne opise. Implementacija tehnoloških alata igra ključnu ulogu u osiguranju kvalitete VGI. Napredni softveri i mobilne aplikacije omogućuju precizno označavanje i prikupljanje podataka, minimizirajući ljudske greške i poboljšavajući točnost informacija.

U posljednje vrijeme se sve više pojavljuju rješenja koja koriste podatke postojećih platformi, npr. društvenih mreža, koje koriste podatke objava i umjetnu inteligenciju kako bi upotrijebili podatke u ranom uzbunjivanju ili praćenju situacije na terenu [16]. Razvoj ovakvih alata osigurava bolju kvalitetu prostornih informacija dobivenih od mnoštva, primjerice [12] istraživanje značajki objava na platformi Twitter potrebno za obuku modela strojnog učenja za

automatsko klasificiranje objava očevidaca i njihovo kombiniranje sa značajkama temeljenim na sadržaju.

### 2.3. Protokoli i okviri za VGI

Zbog nepredvidivosti kriznih događaja za razvoj protokola i podatkovnih okvira potrebno se osloniti na dosadašnje analize i razviti nekoliko vrsta scenarija kako bi se osigurala dosljednost i točnost podataka. Kao primjer, razvijen je fleksibilan protokol za prikupljanje VGI koji se može primijeniti na različite projekte. Uspjeh ovog protokola ovisi o tehnološkoj implementaciji [17]. Kada govorimo o uputama za prikupljanje podataka, postoji dio protokola koji se bavi načinom korištenja podataka ovisno o njihovoj svrsi (engl. *fitness to use*). Zbog toga postoje algoritmi zasnovani na protokolima o kvaliteti podataka koji olakšavaju korisnicima odluku kako će koristiti VGI [18]. Ovi algoritmi temelje se na pojednostavljenom modelu metapodataka [19].

### 3. Kako (zašto) mjeriti kvalitetu VGI?

Procjena kvalitete prostornih podataka je standardizirana međunarodnim standardom za strukturiranu procjenu i izvještavanje o kvaliteti prostornih podataka ISO 19157. Standard pruža elemente za procjenu kvalitete prostornih podataka: kompletnost, logička dosljednost, točnost položaja, vremenska točnost i tematska točnost [20]. U kontekstu VGI smjernice ovog standarda mogu se primijeniti na procjenu točnosti položaja, pouzdanosti i dosljednosti dobrovoljno prikupljenih geoinformacija [8]. Drugi aspekt korištenja ISO 19157 u kontekstu VGI je korištenje VGI za procjenu već prikupljenih podataka s različitih izvora, najčešće uspoređujući sa službenim podacima [21], ali često i s podacima koji su prikupljeni nabavom iz mnoštva (engl. *crowdsourcing*) kao što su OSM (*OpenStreetMap*) podaci [7].

Volonteri mogu ponuditi pomoć procjenom kvalitete velikih količina podataka nakon događaja – primjer su fotografije procjene štete od uragana Sandy iz zraka [22]. No, treba biti pažljiv s ovakvim načinom uključivanja volontera jer može biti jednako osjetljiv na kvalitetu podataka kao što se pokazalo u ovom slučaju gdje se samo 37% volonterske procjene štete slaže sa stručnom procjenom [22].

Kao rezultat primjene ISO 19157 organizacije i dionici koji se bave upravljanjem krizama mogu imati veće povjerenje u kvalitetu prikupljenih VGI podataka. To omogućava bržu reakciju, bolju koordinaciju i informiranije odluke u situacijama kada je brza i pouzdana geoinformacija od važnosti za minimiziranje štete i spašavanje života [23].

### 4. Zaključak

Osiguranje kvalitete VGI podataka uključuje implementaciju smjernica, protokola i najboljih praksi za prikupljanje, označavanje i dijeljenje podataka te obuku sudionika da dosljedno slijede te smjernice. Također, važni su postupci evaluacije uključujući unakrsnu provjeru i usporedbu s referentnim izvorima kako bi se procijenila točnost i pouzdanost podataka.

Implementacija standarda poput ISO 19157 igra ključnu ulogu u procjeni kvalitete VGI podataka omogućavajući filtriranje relevantnih i pouzdanih informacija, posebno tijekom hitnih

situacija. Suradnja između relevantnih dionika, obuka sudionika i multidisciplinarni pristup istaknuti su, također, kao važni elementi u osiguranju kvalitete VGI.

Kroz pažljivu procjenu kvalitete VGI podataka i organizacije dionici koji se bave upravljanjem krizama mogu donositi brže, bolje informirane odluke što je ključno za minimiziranje štete i spašavanje života. Također se istražuje sve veća važnost korištenja društvenih medija u upravljanju katastrofama, pri čemu se ističe potreba za čišćenjem podataka i integracijom društvenih medija s drugim izvorima podataka kako bi se donosile dobro informirane odluke u svim fazama upravljanja katastrofama.

## **Literatura**

- [1] Frančula, N.: Dobrovoljne geoinformacije. *Geodetski list*, 67(4), pp. 299 - 299., 2013.
- [2] Goodchild, M.F.: Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69, pp.211-221, 2007, doi: 10.1007/s10708-007-9111-y
- [3] Tavra, M., Racetin, I., Peroš, J.: The role of crowdsourcing and social media in crisis mapping: a case study of a wildfire reaching Croatian City of Split. *Geoenvironmental Disasters*, 8, pp.1 - 16, 2021, doi: 10.1186/s40677-021-00181-3
- [4] Arapostathis, S.G.: Fundamentals of volunteered geographic information in disaster management related to floods. *Flood Impact Mitigation and Resilience Enhancement*, 2020, doi: 10.5772/intechopen.92225
- [5] Chen, H., Zhang, W.C., Deng, C., Nie, N., Yi, L.: Volunteered geographic information for disaster management with application to earthquake disaster databank & sharing platform. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 57, p. 012015). IOP Publishing, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/57/1/012015
- [6] Shi, R., Liu, C., Gull, N.: Analysis of factors influencing public behavior decision making: under mass incidents. *Frontiers in Psychology*, 13, p. 848075, 2022, doi: 10.3389/fpsyg.2022.848075
- [7] Senaratne, H., Mobasher, A., Ali, A.L., Capineri, C., Haklay, M.: A review of volunteered geographic information quality assessment methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(1), pp.139 - 167, 2017, doi: 10.1080/13658816.2016.1189556
- [8] Antoniou, V., Skopeliti, A., Measures and indicators of VGI quality: An overview. *ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 2, pp. 345-351, 2015, doi: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-345-2015
- [9] Fonte, C.C., Antoniou, V., Bastin, L., Estima, J., Arsanjani, J.J., Bayas, J.C.L., See, L., Vatseva, R.: Assessing VGI data quality. *Mapping and the citizen sensor*, pp.137 - 163, 2017, doi: 10.5334/bbf.g
- [10] Goodchild, M.F., Li, L.: Assuring the quality of volunteered geographic information. *Spatial statistics*, 1, pp. 110-120, 2012, doi: /10.1016/j.spasta.2012.03.002
- [11] Kankanamge, N., Yigitcanlar, T., Goonetilleke, A., Kamruzzaman, M.: Determining disaster severity through social media analysis: Testing the methodology with South East Queensland Flood tweets. *International journal of disaster risk reduction*, 42, p.101360, 2020, doi: 10.1016/j.ijdr.2019.101360

- [12] Zahra, K., Imran, M., Ostermann, F.O.: Automatic identification of eyewitness messages on twitter during disasters. *Information processing & management*, 57(1), p.102107, 2020, doi: 10.1016/j.ipm.2019.102107
- [13] Khajwal, A.B., Noshadravan, A.: An uncertainty-aware framework for reliable disaster damage assessment via crowdsourcing. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 55, p. 102110, 2021, doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102110
- [14] Haworth, B.T., Bruce, E., Whittaker, J., Read, R.: The good, the bad, and the uncertain: Contributions of volunteered geographic information to community disaster resilience. *Frontiers in Earth Science*, 6, p. 183, 2018, doi: 10.3389/feart.2018.00183
- [15] LastQuake, <https://m.emsc.eu/>, 13.07.2023.
- [16] Grassi, L., Ciranni, M., Baglietto, P., Recchiuto, C.T., Maresca, M., Sgorbissa, A.: Emergency management through information crowdsourcing. *Information Processing & Management*, 60(4), p. 103386, 2023, doi: 10.1016/j.ipm.2023.103386
- [17] Minghini, M., Antoniou, V., Fonte, C.C., Estima, J., Olteanu-Raimond, A.M., See, L., Laakso, M., Skopeliti, A., Mooney, P., Arsanjani, J.J., Lupia, F.: The relevance of protocols for VGI collection. In *Mapping and the citizen sensor* (pp. 223 - 247). Ubiquity Press, 2017, doi: 10.5334/bbf.j
- [18] Sboui, T., Aissi, S.: A Risk-Based Approach for Enhancing the Fitness of Use of VGI. *IEEE Access*, 10, pp. 90995-91005, 2022, doi: 10.1109/access.2022.3201022
- [19] Aissi, S., Sboui, T.: Towards evaluating geospatial metadata quality in the context of VGI. *Procedia Computer Science*, 109, pp. 686 - 691, 2017, doi: 10.1109/access.2022.3201022
- [20] ISO 19157-1:2023 Geoinformacije - Kvaliteta podataka, Međunarodna organizacija za standardizaciju, 2023.
- [21] Dorn, H., Törnros, T., Zipf, A.: Quality evaluation of VGI using authoritative data—A comparison with land use data in Southern Germany. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(3), pp.1657-1671, 2015, doi:10.3390/ijgi4031657
- [22] Munro, R., Schnoebelen, T., Erle, S: Quality analysis after action report for the crowdsourced aerial imagery assessment following hurricane sandy. In *ISCRAM 2013 Conference Proceedings – 10th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management*, Baden-Baden, Germany, pp. 929 - 930, 2013
- [23] Honarparvar, S., Malek, M.R., Saeedi, S., Liang, S.: Towards Development of a Real-Time Point Feature Quality Assessment Method for Volunteered Geographic Information Using the Internet of Things. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), pp. 151, doi: 10.3390/ijgi10030151



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.24>

## VARIJABILNOST OČEKIVANE GODIŠNJE ŠTETE KAO INDIKATORA POPLAVNOG RIZIKA

Toni Kekez<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, Hrvatska,  
[toni.kekez@gradst.hr](mailto:toni.kekez@gradst.hr)

### Sažetak

Poplave uzrokovane izlivanjem rijeka spadaju u prirodne katastrofe koje učestalo uzrokuju značajnu novčanu štetu. Procjena poplavnog rizika i efikasno upravljanje njime predstavlja ključan pristup za smanjenje štetnih posljedica u budućnosti. Najčešći pristup kvantifikaciji poplavnog rizika je kroz izračun očekivane godišnje štete koji kombinira vjerojatnost pojave poplavnih događaja i potencijalnu štetu koja može nastati. Međutim, koncept očekivane godišnje štete predstavlja neutralni pristup koji ima za cilj maksimizirati ekonomski aspekt. Stoga se u ovom radu analizira varijabilnost očekivane godišnje štete kroz definiciju distribucije godišnje štete koja ima za cilj pokazati odnos očekivane godišnje štete i relativne godišnje štete prouzrokovane različitim poplavnim scenarijima. Rezultati su pokazali veliku vjerojatnost godišnjeg prekoračenja vrijednosti očekivane godišnje štete. Također, uslijed izražene asimetrije distribucije značajan je utjecaj ekstremnih poplavnih scenarija male vjerojatnosti pojave. Konačno, značajan je utjecaj budućeg stanja na distribuciju godišnje štete kroz povećanu urbanizaciju i utjecaj klimatskih promjena.

*Ključne riječi: poplavni rizik, statistički momenti, distribucija godišnje štete*

## VARIABILITY OF EXPECTED ANNUAL DAMAGE AS FLOOD RISK INDICATOR

### Abstract

River floods are considered to be one of the most significant natural disasters, causing considerable damage each year. Risk assessment, as well as efficient risk management, are key aspects for the mitigation of flood-related consequences. The most common approach for quantifying flood risk is to estimate the expected annual damage, which combines the probability of occurrence and the associated damage. However, the concept of expected annual damage is considered a risk-neutral solution that maximizes economic efficiency. This paper analyzed the variability of expected annual damage as a risk indicator. The goal was to demonstrate the relationship between the expected annual damage and the values of the relative annual damage caused by different flood scenarios. The results showed a high probability of exceeding the expected annual damage. Furthermore, due to the notable asymmetry of the annual distribution of damage, the impact of low-probability flood scenarios with large damage is significant. Finally, future conditions such as climate change and urbanization will have a strong impact on the annual distribution of damage. *Keywords: flood risk, statistical moments, annual damage distribution*



Poplave spadaju u prirodne katastrofe koje prosječno na godišnjoj razini prouzroče preko 7.8 milijardi € štete te su procjene da je samo u Europi svake godine približno 172 000 ljudi izloženo riječnim poplavama [1]. Uslijed izmjene energije i postizanja dinamičke ravnoteže u vodotoku dolazi do izlivanja vode na prirodnom inundacijskom području što se kolokvijalno naziva poplava. Klimatološke prilike kao što su oborine, otapanje snijega i leda, te njihovo kombinirano djelovanje, uzrokuju poplave koje predstavljaju posljedicu površinskog otjecanja kao dijela hidrološkog ciklusa.

Procjena rizika kroz analizu vjerojatnosti pojave poplave i povezanih posljedica predstavlja standardni postupak za kvantifikaciju štetnog učinka na izloženom području. EU Direktiva o poplavama [2] implementirana u legislativu propisuje da se scenariji male, umjerene i velike vjerojatnosti moraju analizirati kako bi se kvantificirao poplavni rizik. S obzirom na utjecaj klimatskih promjena, ali i porast urbanizacije na izloženim područjima, očekuje se da će se poplavni rizik s vremenom povećati. Stoga, efikasno i održivo upravljanje poplavnim rizicima predstavlja jedan od ključnih izazova u budućnosti.

Upravljanje poplavnim rizikom odnosi se na ublažavanje i prevenciju negativnih posljedica poplava kombinacijom tehničkih i netehničkih mjera. Najčešći pristup kvantifikaciji poplavnog rizika je kroz izračun očekivane godišnje štete [3]. Prilikom planiranja investicija u zaštitu od poplava, donositelji odluka oslanjaju se na veličinu očekivane godišnje štete kao indikatora na kojem se baziraju analize troškova i koristi pojedinog projekta. Međutim, koncept očekivane godišnje štete kao osrednje varijable, predstavlja neutralni pristup iz aspekta procjene rizika koji ima za cilj maksimizirati ekonomski aspekt [4] budući da jednako vrednuje utjecaj svih poplavnih događaja.

U ovom radu analizira se koncept očekivane godišnje štete i njegova održivost kroz definiciju distribucije godišnje štete koja ima za cilj pokazati odnos veličine očekivane godišnje štete i relativne godišnje štete uslijed različitih poplavnih scenarija. Također, analiziraju se varijacije vrijednosti očekivane godišnje štete kroz projekciju budućeg stanja.

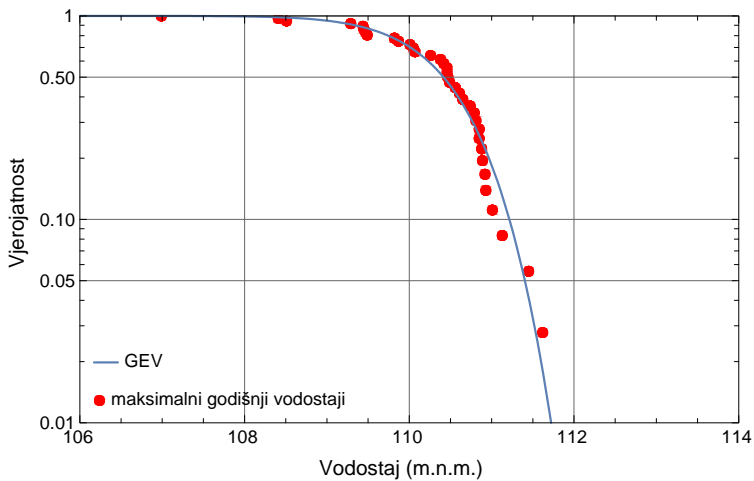
## 5. Kvantifikacija poplavnog rizika

### 5.1. Indikatori poplavnog rizika

Poplavni rizik (1) u općem smislu definiran je kao produkt vjerojatnosti pojave poplavnog događaja i potencijalne štete prouzročene poplavnim događajem:

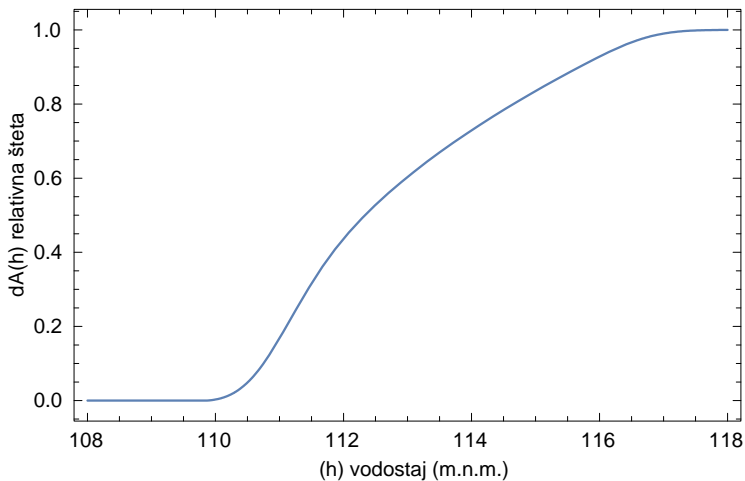
$$\text{Poplavni rizik} = \text{vjerojatnost poplave} \cdot \text{potencijalna šteta} \quad (1)$$

Procjena vjerojatnosti pojave poplavnog događaja temelji se na funkciji gustoće vjerojatnosti koja je definirana temeljem povijesnih podataka o izmjerenim ekstremnim vodostajima. Primjer funkcije gustoće vjerojatnosti za različite vrijednosti izmjerenih vodostaja prikazan je na Slici 1. gdje je za izmjerene set podataka odabrana teorijska distribucija pod nazivom *Generalized Extreme Value* (GEV).



**Slika 1.** Maksimalni godišnji vodostaji opisani s GEV funkcijom

Odabrana teorijska distribucija koja opisuje vjerojatnosti pojave ekstremnih vodostaja predstavlja ulaznu varijablu za definiranje poplavnih događaja i odgovarajuće štete. Potencijalna šteta na imovini za svaki poplavni događaj određena je temeljem *vodostaj-šteta* funkcije (Slika 2.) razvijene za urbane aglomeracije [5].



**Slika 2.** Primjer *vodostaj-šteta* funkcije za procjenu relativne štete

Konačno, očekivana godišnja šteta kao indikator ekonomske kvantifikacije poplavnog rizika predstavlja sumu umnoška svih vjerojatnosti pojave poplavnih događaja i veličine odgovarajuće relativne štete. Promatra li se godišnja šteta kao slučajna varijabla, onda očekivana godišnja šteta (EAD) predstavlja prvi statistički moment:

$$EAD = \mu_{AD} = \int_0^{\infty} \int_0^h f(\lambda) d_1(h, \lambda, k) p(h) d\lambda dh \quad (2)$$

## 5.2. Statistički momenti višeg reda i distribucija godišnje štete

Nesigurnost u procjeni rizika primjenom parametra očekivane godišnje štete temelji se na činjenici da navedeni koncept predstavlja neutralni pristup za ekonomsku kvantifikaciju poplavnog rizika, posebice zanemarujući pritom utjecaj ekstremnih događaja male vjerojatnosti. Nesigurnost u procjeni slučajne varijable godišnje štete promatra se kroz analizu varijance godišnje štete (3), kao i ostalih karakteristika funkcije distribucije putem statističkih momenata višeg reda (4, 5) čije će se vrijednosti izračunati temeljem izvedenih analitičkih izraza [5]:

$$\sigma_{AD}^2 = \int_0^{\infty} [d_A(h, k)]^2 p(h) dh - [\mu_{AD}]^2 \quad (3)$$

$$\mu_3 = \int_0^{\infty} [d_A(h, k)]^3 p(h) dh - 3\mu_{AD}\sigma_{AD}^2 - [\mu_{AD}]^3 \quad (4)$$

$$\mu_4 = \int_0^{\infty} [d_A(h, k)]^4 p(h) dh - 4\mu_{AD} \int_0^{\infty} [d_A(h, k)]^3 p(h) dh + 6\mu_{AD}^2 \sigma_{AD}^2 + 3[\mu_{AD}]^4 \quad (5)$$

gdje  $\mu_3$  i  $\mu_4$  predstavljaju treći i četvrti statistički moment godišnje štete a skošenost i spljoštenost funkcije godišnje štete evaluiraju se kroz  $\mu_3/\sigma_{AD}^3$  odnosno  $\mu_4/\sigma_{AD}^4$ .

Koristeći izračunate vrijednosti statističkih momenata definirat će se distribucija godišnje štete kao i vrijednosti viših statističkih momenata. Za definiciju distribucije godišnje štete odabrana je beta distribucija budući da su vrijednosti relativne godišnje štete u rasponu 0-1.

## 6. Rezultati procjene poplavnog rizika

### 6.1. Distribucija godišnje štete

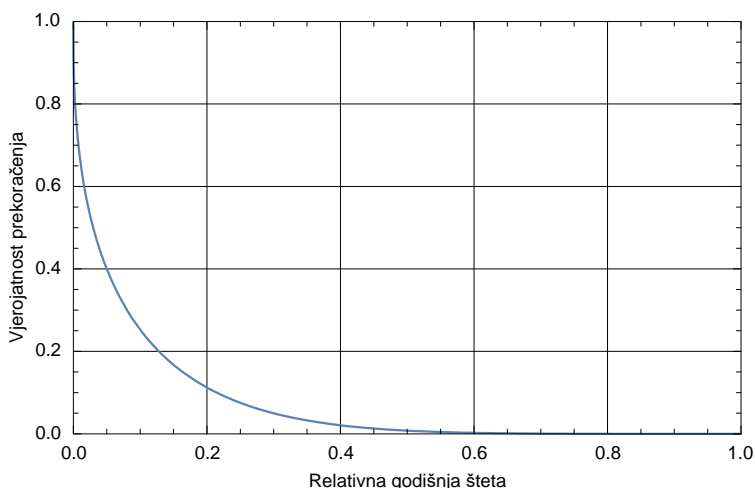
Koristeći predloženi pristup definirana je distribucija godišnje štete koja obuhvaća cijeli prostor vjerojatnosti (Slika 3.), a ne samo diskretne vrijednosti. Temeljem analitičkih izraza (2, 3, 4, 5), za konkretan primjer izračunata su i četiri statistička momenta (Tablica 1.)

**Tablica 1.** Vrijednosti prva četiri statistička momenta distribucije godišnje štete

EAD ( $\mu_{AD}$ )	Standardna devijacija ( $\sigma_{AD}$ )	Skošenost ( $\mu_3/\sigma_{AD}^3$ )	Spljoštenost ( $\mu_4/\sigma_{AD}^4$ )
0,074	0,1	1,75	5,55

Distribucija godišnje štete na Slici 3. prikazana je u formi funkcije prekoračenja. Ovakav pristup često se koristi u analizama prirodnih katastrofa [6] i predstavlja vjerojatnost da slučajna varijabla godišnje štete prekorači određenu vrijednost. Analizirajući oblik distribucije, izraženi koeficijent asimetrije odnosno pozitivna skošenost, kao i leptokurtični oblik, ukazuju da postoji značajan utjecaj događaja male vjerojatnosti i visoke štete na konačni oblik distribucije. Analizirajući rezultate temeljem distribucije godišnje štete, vrijednost očekivane

godišnje štete jednaka je 0,074 odnosno 7,4 % ukupne štete. Međutim, vjerojatnost prekoračenja očekivane godišnje štete uslijed izražene asimetrije iznosi čak 31 %.



**Slika 3.** Distribucija godišnje poplavne štete

Rezultati prikazani u Tablici 2. odnose se na izračunate vjerojatnosti prekoračenja odgovarajuće vrijednosti relativne godišnje štete za pojedine poplavne scenarije. Rezultati pokazuju da je vjerojatnost prekoračenja godišnje štete za poplavne scenarije veće vjerojatnosti u skladu s vrijednostima godišnje vjerojatnosti pojave. Međutim, promatraju li se ekstremni događaji poput 500 godišnje poplave, vjerojatnost prekoračenja godišnje štete iznosi 1,4%, što je sedam puta više u odnosu na godišnju vjerojatnost pojave od 0,2%.

**Tablica 2.** Vjerojatnost prekoračenja očekivane godišnje štete za različite scenarije

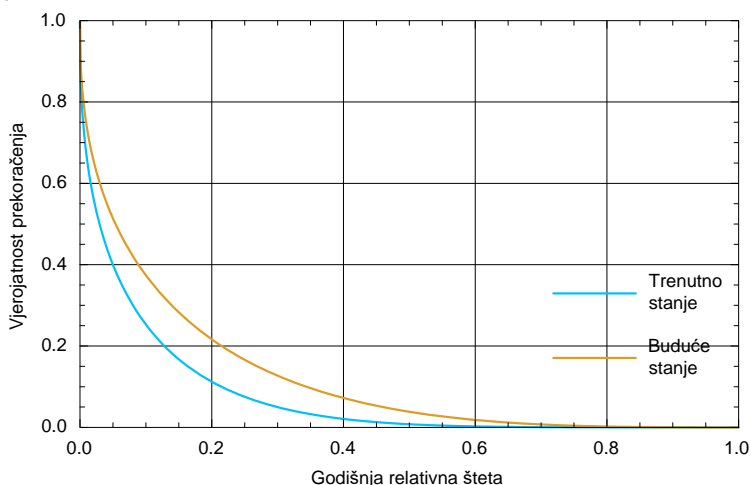
Povratni period	Vjerojatnost pojave	Godišnja relativna šteta	Vjerojatnost prekoračenja (%)
10	0,1	0,23	8,7
50	0,02	0,39	2,8
100	0,01	0,43	2
500	0,002	0,49	1,4

## 6.2. Utjecaj budućeg stanja na distribuciju godišnje štete

Uzimajući u obzir promjene koje se mogu dogoditi u budućnosti, nužno je ispitati promjene koje mogu nastati u distribuciji godišnje štete uslijed, primjerice, klimatskih promjena ili dodatne urbanizacije. Budući da vrijednosti očekivane godišnje štete proizlaze iz distribucije godišnje štete, promjene u vrijednostima mogu direktno utjecati na planiranu ekonomsku analizu te održivost implementiranih mjera obrane. Utjecaj budućeg stanja na distribuciju godišnje štete demonstriran je za primjer povećanja urbanizacije na promatranom području,

što rezultira s potencijalno većom izloženosti poplavnim događajima i promjenom u distribuciji godišnje štete.

Promatrajući iznos od 0,23 relativne štete, što odgovara poplavnom scenariju povratnog perioda 10 godina, primjećuje se da vjerojatnost prekoračenja raste na 18 % u usporedbu s prethodnih 8,7 %. S druge strane, za poplavni scenarij koji odgovara povratnom periodu od 100 godina, veličina odgovarajuće godišnje relativne štete pada s 0,43 na 0,35 ali vjerojatnost prekoračenja raste na 7,3 %.



Slika 4. Promjene u distribuciji godišnje poplavne štete za buduće stanje

## Literatura

- [1] Dottori, F., Mentaschi, L., Bianchi, A., Alfieri, L. and Feyen, L., Adapting to rising river flood risk in the EU under climate change, EUR 29955 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-12946-2, doi:10.2760/14505, JRC118425.
- [2] Europska Komisija, Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the Assessment and Management of Flood Risks, (Direktiva 2007/60/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 23. listopada 2007. o procjeni i upravljanju rizicima od poplava), 2007. Dostupno online: <https://eurlex.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj>
- [3] Merz, B.; Kreibich, H.; Schwarze, R.; Thielen, A. Review article assessment of economic flood damage, Natural Hazards and Earth System Sciences 2010, 10, 1697 –1724. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- [4] Merz, B.; Elmer, F.; Thielen, A.H. Significance of high probability/low damage versus low probability/high damage flood events. Natural Hazards and Earth System Sciences 2009, 9, 1033–1046. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1033-2009>
- [5] Kekez T, Andricevic R, Knezic S. Flood Risk Modeling under Uncertainties: The Case Study of Croatia. Water. 2022; 14(10):1585. <https://doi.org/10.3390/w14101585>
- [6] Humphreys, N. Exceedance probability in catastrophic modeling. Casualty Actuarial Society E-Forum 2021, 1 – 61.

ISBN 978-953-6116-97-3  
e-ISBN 978-953-6116-98-0



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023>