

# Zajednički temelji 2018 - uniSTem : šesti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, 25.-26. rujna 2018., Split : zbornik radova

---

**Edited book / Urednička knjiga**

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

*Publication year / Godina izdavanja:* **2018**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:413186>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



# Zajednički temelji 2018. - uniSTem

Šesti skup mladih istraživača iz područja  
građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti

Split, 25.-26. rujna 2018.

## ZBORNİK RADOVA



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



**—CA—**  
SVEUČILIŠTE U SPLITU,  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE



## **Izdavač**

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

## **Urednice**

Dr.sc. Marina Sunara Kusić,  
mag.ing.aedif.  
Dr.sc. Morena Galešić,  
mag.ing.aedif.

## **Dizajn naslovnice**

Doc.dr.sc. Dujmo Žižić,  
dipl.ing.arh.

## **Lektura**

Stella Čular, prof. (hrvatski)  
Robert Šakić Trogrlić,  
mag.ing.aedif. (engleski)

## **Tisak**

Adria Screen, 2018.

## **Naklada**

100 kom.

**ISBN 978-953-6116-77-5**

**e-ISBN 978-953-6116-78-2**

Split, rujan 2018.

*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  
(6 ; 2018 ; Split)*

*Zajednički temelji 2018 - uniSTem : šesti skup  
mladih istraživača iz područja građevinarstva i  
srodnih tehničkih znanosti, 25.-26.rujna 2018.,  
Split : zbornik radova / urednice Marina Sunara  
Kusić, Morena Galešić. - Split : Fakultet  
građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2018.*

*Bibliografija uz svaki rad. - Sažeci ; Abstracts.*

ISBN 978-953-6116-77-5

*1. Sunara Kusić, Marina 2. Galešić, Morena  
I. Građevinarstvo -- Zbornik II. Arhitektura --  
Zbornik III. Geodezija -- Zbornik*

170522018

*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.*



Udruga hrvatskih građevinskih fakulteta  
Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije



# **ZAJEDNIČKI TEMELJI 2018 - uniSTem**

**Šesti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva  
i srodnih tehničkih znanosti**

## **Zbornik radova**

25.-26. rujna 2018., Split

## **Organizacijski odbor skupa**

Ivan Balić  
Ivan Banović  
Marin Barišić  
Bruno Bartulović  
Hrvoje Bartulović  
Vladimir Divić  
Daniela Dumanić  
Morena Galešić  
Marko Goreta  
Majda Ivić  
Grgo Kamber  
Jelena Lovrić Vranković  
Josip Peroš  
Ana Ricov  
Marija Smilović Zulim  
Marina Sunara  
Petra Šimundić  
Marina Tavra  
Dujmo Žižić

## **Moderatori sekcija**

Ivan Balić  
Goran Baloević  
Vladimir Divić  
Ivan Đepina  
Morena Galešić  
Ana Kadić  
Hrvoje Smoljanović  
Goran Vlastelica  
Nikolina Živaljić  
Dujmo Žižić

## Predgovor

*Scientists, therefore, are dealing with doubt and uncertainty. All scientific knowledge is uncertain. This experience with doubt and uncertainty is important. I believe that it is of great value, and one that extends beyond the sciences. I believe that to solve any problem that has never been solved before, you have to leave the door to the unknown ajar. You have to permit the possibility that you do not have it exactly right. Otherwise, if you have made up your mind already, you might not solve it.*

Feynman, 1998.

*Our task is to communicate experience and ideas to others. We must strive continually to extend the scope of our description, but in such a way that our messages do not thereby lose their objective or unambiguous character.*

Niels Bohr, 1934.

Biti znanstvenik predstavlja svojevrsni poziv, prihvaćanje nepoznatog kao svakodnevnice i odlazak na avanturu potrage znanstvenih istina. Zahtjevni pothvati iziskuju odgovarajuće treninge i pripreme, i upravo ti treninzi su najvažniji za mlade znanstvenike na početku njihove avanture. Baš kao što je i svaka avantura zabavnija, ugodnija i uspješnija u društvu prijatelja i kolega, tako je i mladom znanstveniku uz trenera (mentora), potreban što širi i raznolikiji krug prijatelja, kolega i poznanika.

*Zajednički temelji* su redoviti skup mladih istraživača (doktoranada i poslijedoktoranada) iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti. Skup je zamišljen na način da bude platforma za jedna od prvih izlaganja mladih istraživača, što im omogućava svojevrsne treninge za daljnja prezentiranja i istraživački rad, te adekvatno umrežavanje. Sudionici prezentiraju svoja istraživanja ili koncept istraživanja pred kolegama iz različitih STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) područja, a njihovi sažeci ili radovi su objavljeni u zborniku. Svaki skup svakako sadrži najmanje jedno pozvano predavanje i radionicu ili okrugli stol na jednu od aktualnih tema vezanih za znanstveno-istraživačku domenu i položaj mladih u istoj.

Ove godine se održava šesti po redu skup, i to nazad na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije (FGAG), Sveučilišta u Splitu, gdje je održan i prvi skup u rujnu 2013. Ideja o kreiranju ovakvog skupa je došla sa sastanka Udruge hrvatskih građevinskih fakulteta (UHGF) u veljači 2013. godine. Udruga je ujedno i kontinuirani organizator i sponzor ovog događanja s obzirom da su *Zajednički temelji* u skladu s mnogim od ciljeva same Udruge, a koji uključuju: poticanje znanstvenog i istraživačkog rada; osiguranje kvalitete istraživanja i obrazovanja; razmjenu informacija i iskustava; poticanje, promicanje i sudjelovanje u razvoju struke i akademske zajednice; te na pomoć mladima u razvoju njihovih znanja. Građevinski fakultet u Rijeci i njihov tim mladih istraživača su 2014. godine

napravili izvanredan posao i nastavili u duhu temelja graditi dalje. Iako van granica Hrvatske, tim Građevinskog fakulteta u Mostaru je entuzijastično nastavio štafetu organizirajući skup u rujnu 2015. godine. Potom je Građevinski fakultet Osijek spremno preuzeo posao te u rujnu 2016. godine organizirao četvrti po redu skup. Peti skup je održan u glavnom gradu, Zagrebu, gdje je organizacijski tim mladih istraživača napravio vrhunski posao u rujnu 2017. godine, te su prvi put i uvedeni cjeloviti radovi.

Kako bi se nastavio ovako pozitivan trend rastućeg ulaganja u bolju prepoznatljivost samog skupa, sudionika i njihovih istraživanja, i ove godine je pripremljen zbornik cjelovitih radova koji su prošli domaću recenziju. Navedeni zbornik sadrži 34 recenzirana rada iz područja različitih grana građevinarstva, arhitekture, geodezije, računarstva i fizike. S obzirom na raznolikost tema istraživanja, radovi su prikazani prema abecednom popisu prezimena prvog autora. Poučeni iskustvom zbornika *Zajednički temelji 2017*, svaki rad ima dvojezični naslov, sažetak i ključne riječi, koje bi zajedno s DOI (*Digital Object Identifier*) brojem trebali pozitivno utjecati na povećanje vidljivosti mladih istraživača koji su odlučili malo trenirati na ovom skupu.

Zbornik *Zajednički temelji 2018* je pripremljen zahvaljujući velikom trudu svih autora, recenzenata, lektora i urednika. Ovim putem se zahvaljujemo svim članovima organizacijskog odbora, upravi Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije, Udruzi hrvatskih građevinskih fakulteta, Sveučilištu u Splitu, Galeriji Meštrović, Muzeju grada Splita, pozvanim predavačima i najviše od svega mladim sudionicima koji su prepoznali važnost ovakvih događanja. Nastavimo dobru praksu i sad već šestogodišnju tradiciju zajedničkih temelja i zajedničkih treninga, dijelimo iskustva, ideje i pogreške kako bi nam svima znanstvena avantura bila zanimljivija i uspješnija!

Predsjednica organizacijskog odbora

Morena Galešić

## Sadržaj

<b>Predgovor</b> .....	4
<b>Seizmička izolacija osnove građevine uporabom kamenih oblutaka</b> Banović I., Radnić J., Grgić N. ....	10
<b>Ponašanje ciklički opterećenog spoja u kutu drvenog okvira izvedenog ulijepljenom šipkom</b> Barbalić J., Rajčić V. ....	16
<b>Analiza turističkog potencijala Parka prirode Biokovo: primjeri lokaliteta Podglogovik i Rastovac</b> Bartulović B. ....	22
<b>Računalni programi za provjeru provodnosti na cestovnim raskrižjima</b> Bezina Š., Cestar I., Stančerić I. ....	32
<b>Primjena praha otpadnih guma kao zamjenskog materijala (punila) u samozbijajućem betonu (SCC)</b> Bušić R., Miličević I. ....	38
<b>The impact of engineering-induced transient flow on transport in natural aquifers</b> Di Dato M., Barros F. P. J. , Fiori A., Bellin A. ....	46
<b>Nesigurnost modela za procjenu erozije u funkciji varijabilnih ulaznih podataka</b> Dragičević N., Karleuša B., Ožanić N. ....	52
<b>Priprema vode za piće i primjena raspoloživih modela pripreme vode za piće</b> Džeba T. ....	58
<b>Strength grading of structural timber</b> Fortuna B., Plos M., Šuligoj T., Turk G. ....	66
<b>Praćenje pukotina u betonu primjenom digitalne analize slike</b> Frančić Smrkić M. ....	72
<b>Numeričko modeliranje točkastih toplinskih mostova ventiliranih fasadnih sustava</b> Gaši M. ....	76
<b>Analiza pouzdanosti armiranobetonskog okvira metodom konačnih elemenata (MKE)</b> Grubišić M., Ivošević J. ....	82
<b>Modeliranje spoja stupa i naglavne ploče mosta</b> Jurišić M. ....	94
<b>Numeričko adaptivno modeliranje advektivno dominantnih problema koristeći modificirane hijerarhijske Fup bazne funkcije</b> Kamber G., Gotovac H., Kozulić V., Malenica L., Gotovac B. ....	100
<b>Primjena i integracija sustava BIM i ERP u građevinarstvu</b> Kolarić S., Vukomanović M. ....	108

<b>Rekonstrukcija Studentskog doma Ivan Goran Kovačić u Osijeku</b>	
Krajnović M. ....	114
<b>STREAM 1D: Numerički model za prognoziranje prodora slane vode u izrazito uslojenim ušćima</b>	
Krvavica N., Ožanić N. ....	120
<b>Dynamic assignment of loading bays for efficient urban last mile deliveries</b>	
Letnik T. Mencinger M., Božičnik S. ....	126
<b>Eksperimentalno istraživanje i numeričko modeliranje lijepljenog lameliranog drva</b>	
Lovrić Vranković J., Boko I., Divić V. ....	134
<b>Pregled statističkih metoda za procjenu kritične vremenske praznine na kružnom raskrižju</b>	
Maslač D., Jurić Z., Miletić K. ....	142
<b>Arhitektura, konstrukcija i konzervacija: reprezentativna palača tridesetih godina u Zagrebu</b>	
Matan C. ....	150
<b>Kibernetika – što je to?.....</b>	158
Obradović D. ....	158
<b>Optimized indoor positioning using graph-theory-based map matching</b>	
Pauković M., Stella M., Russo M. ....	164
<b>Primjena terestričkog laserskog skenera u ispitivanju nadzemnih metalnih spremnika nafte prema američkoj normi API 653</b>	
Peroš J. ....	172
<b>Beech as construction wood</b>	
Plos M., Fortuna B., Šuligoj T., Turk G. ....	180
<b>Primjena elektrokoagulacije u cilju smanjenja koncentracije fosfata u vodama</b>	
Posavčić H., Halkijević I., Lončar G. ....	186
<b>Pedagogical and research work on Building Information Modeling in construction management</b>	
Pučko Z., Klanšek U., Šuman N. ....	192
<b>Model predviđanja otopljenog kisika za različite scenarije - Drava kod Donjeg Miholjca</b>	
Rabi A. ....	200
<b>Razvoj teorije blokova u stijenskom inženjerstvu</b>	
Rossi N., Mance M., Kovačević M. S. ....	208
<b>Utjecaj recikliranog agregata od gume na materijalnu nelinearnost betona</b>	
Strukar K., Kalman Šipoš T. ....	216

<b>Aparatura za mjerenje električnog otpora u temperaturnom rasponu od 300 K do 670 K</b>	
Šćurla J., Pranić P., Puljas A., Bilušić A. ....	224
<b>Distribuirana arhitektura za skalabilno motrenje i nadzor</b>	
Šerić LJ., Rezo F., Balić D. ....	232
<b>Strengthening of timber floors with CLT panels – a numerical study</b>	
Unuk Ž., Žegarac Leskovar V., Premrov M. ....	238
<b>Comparison of building's external wall components based on global warming potential</b>	
Žigart M., Kovačić Lukman R., Premrov M., Žegarac Leskovar V. ....	244





## Seizmička izolacija osnove građevine uporabom kamenih oblutaka

Ivan Banović<sup>1</sup>, Jure Radnić<sup>1</sup>, Nikola Grgić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Republika Hrvatska, {ivan.banovic; jure.radnic; nikola.grgic}@gradst.hr

### Sažetak

Prikazani su rezultati eksperimentalne studije efikasnosti seizmičke izolacije pomoću sloja od prirodnih kamenih oblutaka. Ispitivani su modeli krute i srednje krute zgrade. Razmatrani su slučajevi oslanjanja modela na krutu podlogu te na četiri različite podloge od oblutaka (tanka i debela podloga sa sitnom i krupnom frakcijom oblutaka). Aplicirana su četiri različita horizontalna akceleroograma i mjereni karakteristični pomaci, ubrzanja i deformacije na testiranim modelima. Sve deformacije/naprezanja modela ostala su u elastičnom području. Zaključeno je da efikasnost sloja od kamenih oblutaka ispod temelja, u odnosu na klasično rješenje s krutom podlogom, značajno ovisi o tipu apliciranog akceleroograma i relativno malo o razmatranim debljinama sloja i frakcijama oblutaka. Rješenje se pokazalo vrlo efikasnim, uz smanjenje potresnih sila čak do oko 70 %.

*Ključne riječi: potresna platforma, seizmička izolacija, prirodni kameni oblutci*

## Seismic base isolation using a layer of natural stone pebbles

### Abstract

The results of a shake table study of the effectiveness of seismic base isolation using a layer of natural stone pebbles are presented. Models of stiff and medium-stiff buildings were tested. Case studies were conducted with the model foundation on the rigid base and four different layers of pebbles (thin and thick layer with small and large pebbles). Four different horizontal accelerograms were applied. The characteristic displacements, accelerations and strains were measured. Strains/stresses of the tested models were in the elastic area. It was concluded that the efficiency of the stone pebbles layer under the foundation, compared to the classical solution of a foundation, strongly depends on the type of the applied excitation and depends relatively little on the layer thickness and pebbles fraction. The solution proved to be very efficient, with a reduction of earthquake forces up to about 70%.

*Keywords: shake table, seismic base isolation, natural stone pebbles*

## **1. Uvod**

U tradicionalnom pristupu projektiranju i proračunu konstrukcija, ubrzanje tla uslijed potresa direktno se aplicira na konstrukciju. Da bi se postigla potrebna razina sigurnosti, koristeći norme za projektiranje i proračun konstrukcija, ovaj pristup često rezultira visokom cijenom izrade konstrukcije.

Seizmička izolacija građevine je tehnika kojom se štiti nosiva konstrukcija i nenosivi dijelovi građevine od razornih utjecaja potresa. Suvremena znanost zadnjih desetljeća istražuje razne tehnike seizmičke izolacije osnove građevine kojima se potresno gibanje tla (ubrzanje) prigušuje prije nego se prenese na građevinu. U pristupu sa seizmičkom izolacijom osnove građevine, nosiva struktura je odvojena od gibanja autohtonog tla uslijed potresa raznim posmično „mekim“ uređajima. Općenito, osnovni koncept seizmičke izolacije građevina je pomicanje osnovnog perioda konstrukcije izvan dominantnog frekventnog područja očekivanih potresa. Posljedica korištenja ovog pristupa je povećanje pomaka konstrukcije u slučaju potresa koje treba kontrolirati i ograničiti.

Rješenja sa slojem od adekvatnih materijala ispod temelja za smanjenje seizmičkih sila na građevine, za koja se očekuje da mogu biti efikasna i racionalna, u začetku su istraživanja. Postoje indicije da su još u dalekoj prošlosti graditelji koristili slojeve od različitih materijala s ciljem povećanja seizmičke otpornosti građevina. Takva jeftina rješenja bi mogla naći široku primjenu u seizmičkoj izolaciji srednje visokih zgrada širom svijeta. Suvremena znanost pokušava istražiti tu ideju i pronaći rješenja kojima bi se kod brojnih građevina moglo nadomjestiti seizmičku izolaciju pomoću sofisticiranih uređaja. Rezultati istraživanja jednog takvog tipa seizmičke izolacije su prezentirani u ovom radu.

Prema dostupnim informacijama, do sada je objavljeno vrlo malo radova u kojima se istraživala „jeftina“ seizmička izolacija osnove građevine pomoću prirodnih materijala. Rezultati nekih dosadašnjih istraživanja mogu se naći u [1-4].

U ovom su radu prikazani rezultati eksperimentalne studije o efikasnosti primjene sloja od prirodnih kamenih oblutaka ispod temelja na smanjenje potresnih sila na konstrukcije. Konačan cilj je praktična primjena takvog rješenja u budućnosti pri gradnji srednje visokih zgrada i manjih mostova u seizmičkim područjima. Istraživanja su provedena na jednostavnim modelima krute i srednje krute zgrade koristeći potresnu platformu, pomoću koje su aplicirana četiri različita akcelerograma koja su prouzrokovala naprezanja modela u elastičnom području. Najprije je istražen odgovor modela s njegovim temeljima oslonjenim izravno na krutu podlogu (potresnu platformu), a potom s temeljima oslonjenim na sloj od kamenih oblutaka. Varirane su dvije debljine sloja i dvije frakcije kamenih oblutaka. Mjereni su karakteristični pomaci, deformacije i ubrzanja modela. Prikazani su i neki diskutirani rezultati studije, s glavnim zaključcima istraživanja. Rezultati provedene studije su ohrabrujući u pogledu efikasnosti razmatrane seizmičke izolacije. Ipak, potrebna su daljnja istraživanja utjecaja još nekih važnih efekata, koji u provedenoj studiji nisu razmatrani, kako bi se mogli dobiti još vjerodostojniji zaključci u pogledu efikasnosti i racionalnosti razmatranog koncepta seizmičke izolacije osnove građevine.

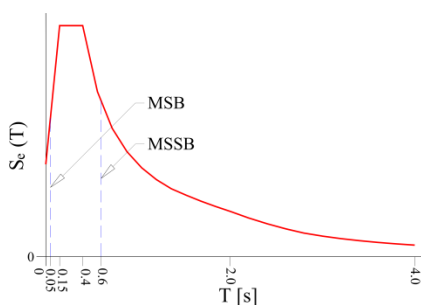
## 2. Kameni oblutci i podloga od oblutaka ispod temelja

U ovoj su eksperimentalnoj studiji korišteni kameni oblutci iz riječnog korita. Oblutci su pretežito iz vapnenca i manjim dijelom iz granita. Korištene su dvije frakcije oblutaka: 4-8 mm (tzv. sitni oblutci) i 16-32 mm (tzv. krupni oblutci) te dvije debljine podloge:  $d=0.3$  m (tzv. tanka podloga) i  $d=0.6$  m (tzv. debela podloga). Podloge su formirane unutar sanduka tlocrtnih dimenzija  $2.5 \times 2.5$  m, koji je fiksiran za platformu. Nastojalo se da deformacijski uvjeti podloge unutar sanduka budu slični onima koje bi podloga imala ispod temelja realne građevine. Podloge su formirane u slojevima debljine  $0.10$  m, uz lagano statičko i dinamičko zbijanje pomoću potresne platforme. Prosječna zbijenost podloge na vrhu iznosila je oko  $30$  MPa.

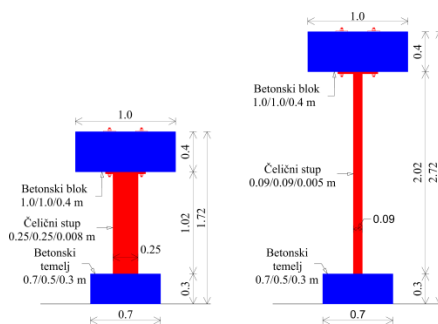
## 3. Usvojeni modeli zgrada

Potresne sile na građevinu značajno ovise o njenim dinamičkim karakteristikama koje ovise o njenoj krutosti i masi. Dinamičke karakteristike građevine dobro su opisane njenim periodima i oblicima slobodnih oscilacija. Prema [5], za tip 1 i tip tla A, projektne seizmičke sile za jednostupnjevnj konzolni stup s masom na vrhu su definirane ovisno o njegovom periodu slobodnih oscilacija  $T$  (Slika 1).

Umjesto modela realne zgrade u umanjenom mjerilu, što bi rezultiralo nizom problema i dvojbi, u ovoj je studiji korišten zamjenjujući model zgrade s konzolnim jednostupnjevnim stupom s masom na vrhu koji ima prvi period slobodnih oscilacija  $T_1$  kao i realna zgrada. Dakle takav model dobro reprezentira dinamičke karakteristike realne zgrade. Testirana su dva modela zgrada prema Slici 2, model MSB kod kojeg je eksperimentalno utvrđen  $T_1=0.05$  s i reprezentira krute zgrade te model MSSB kod kojeg je eksperimentalno utvrđen  $T_1=0.6$  s i reprezentira srednje krute zgrade. U usvojenim modelima uključen je i temelj jer ponašanje realnih zgrada pri potresu značajno ovisi o njihovim temeljima. Pri proračunu seizmičkih sila temeljenom na jednostupnjevnom sustavu, polazi se od pretpostavke potpunog uklještenja dna stupa u temelj, tj. da nema vertikalnih pomaka i rotacije temelja. U ovom su istraživanju ovi efekti uključeni u razmatranje.



Slika 1. Spektar odgovora prema [5], za tip 1 i kategoriju tla A



a) MSB ( $T=0.05$  s)

b) MSSB ( $T=0.6$  s)

Slika 2. Testirani uzorci

## 4. Testirani uzorci i aplicirane pobude

Eksperimentalno je ispitano deset različitih uzoraka na četiri ubrzanja podloge. Prvo su ispitivani modeli MSB i MSSB oslonjeni na krutu podlogu. Iznad platforme izveden je sloj betona debljine  $d = 0.10$  m koji simulira uobičajeni podbeton ispod temelja realnih zgrada. Ovo stanje približno odgovara realnim zgradama koje su izravno temeljene na čvrstom temeljnom tlu bez potresne izolacije. Kod toga je spriječen horizontalni pomak temelja u odnosu na podlogu, dok je omogućeno odizanje temelja od podloge.

Potom su ispitivani modeli MSB i MSSB oslonjeni na podlogu od kamenih oblutaka. Kod toga je varirana debljina podloge (0.3 m i 0.6 m) i frakcija oblutaka (4-8 mm i 16-32 mm).

Razmatrani modeli zgrada s usvojenim podlogama izloženi su horizontalnim ubrzanjima potresne platforme u smjeru veće tlocrtno dimenzije temelja. Apliciran je umjetni akcelerogram (formiran za elastični spektar prema [5], tlo kategorije A), akcelerogram potresa Petrovac, akcelerogram potresa Banja Luka i akcelerogram potresa Ston. Maksimalno ubrzanje akcelerograma  $a_{g,max}$  skalirano je na  $a_{max} = 0.3$  g za model MSB, a za model MSSB na 0.2 g. Sloj oblutaka poslije svake aplicirane pobude doveden je u početno stanje.

### 4.1. Mjerene veličine i oprema za ispitivanje i mjerenje

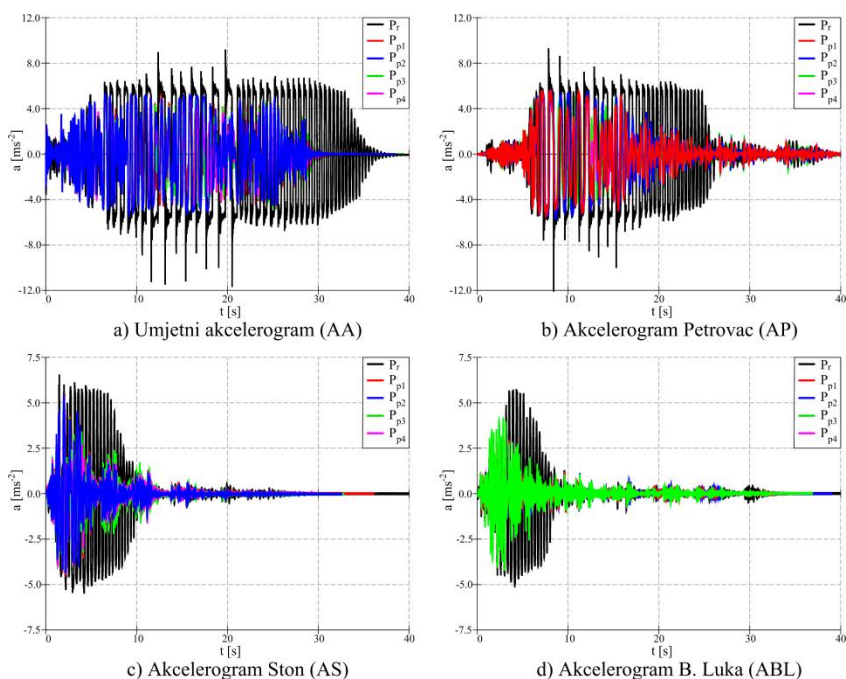
Na svakom su testiranom uzorku mjerene sljedeće veličine: horizontalni pomak u težištu mase na vrhu stupa ( $u_1$ ), horizontalni pomak pri vrhu temelja ( $u_2$ ), vertikalni pomak vrha temelja na desnom rubu ( $v_1$ ) i lijevom rubu ( $v_2$ ), vertikalna deformacija pri dnu stupa s desne strane ( $\varepsilon_1$ ) i lijeve strane ( $\varepsilon_2$ ) te horizontalno ubrzanje u težištu mase na vrhu stupa ( $a$ ).

Usvojena ubrzanja podloge aplicirana su pomoću potresne platforme u Laboratoriju za potresna ispitivanja na Sveučilištu u Splitu. Prikupljanje podataka sa svih senzora izvršeno je pomoću sustava Quantum-x mx 840A (HBM). Pomaci su mjereni pomoću analognih mjerača pomaka, tip PB-25-S10-N0S-10C (*Uni Measure*), deformacije su mjerene pomoću elektrootpornih mjernih traka dužine 6 mm, tip 6/120 LY11 (HBM), dok su ubrzanja mjerena piezo - električnim niskofrekventnim akcelerometrom tip 4610 (MS).

## 5. Eksperimentalni rezultati

Prikazano je nekoliko rezultata zbog ograničene veličine rada, odvojeno za svaki aplicirani akcelerogram, za svih pet razmatranih tipova podloga:  $P_r$  - kruta podloga;  $P_{p1}$  - podloga od oblutaka frakcije 16-32 mm, debljine sloja 0.3 m;  $P_{p2}$  - podloga od oblutaka frakcije 16-32 mm, debljine sloja 0.6 m;  $P_{p3}$  - podloga od oblutaka frakcije 4-8 mm, debljine sloja 0.3 m;  $P_{p4}$  - podloga od oblutaka frakcije 4-8 mm, debljine sloja 0.6 m.

Horizontalno ubrzanje ( $a$ ) u težištu mase na vrhu stupa prikazano je na Slici 3. Primjetno je da je najveće ubrzanje za sve razmatrane akcelerograme imala kruta podloga, te da se maksimalna ubrzanja za usvojene podloge od oblutaka malo razlikuju. U odnosu na krutu podlogu, najmanje smanjenje ubrzanja imala je tanka podloga od krupnih oblutaka.


**Slika 3.** Ubrzanje (a) u težištu mase na vrhu stupa za model MSB

U Tablici 1 prikazane su najveće izmjerene vrijednosti eksperimentalnih rezultata i njihov odnos.

**Tablica 1.** Maksimalne vrijednosti nekih izmjerenih veličina i njihov odnos

Aplicirana pobuda	Testirani model	Horizontalni pomak težišta bloka			Vertikalno odizanje vrha temelja			Ubrzanje težišta bloka			Deformacija na dn stupa		
		$u_1$ [mm]	$u_1^*$ [mm]	$\frac{u_1^*}{u_1}$	$v_1, v_2$ [mm]	$v_1^*, v_2^*$ [mm]	$\frac{v_1^*, v_2^*}{v_1, v_2}$	$a$ [ms <sup>-2</sup> ]	$a^*$ [ms <sup>-2</sup> ]	$\frac{a^*}{a}$	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ [ <sup>0</sup> / <sub>100</sub> ]	$\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*$ [ <sup>0</sup> / <sub>100</sub> ]	$\frac{\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*}{\varepsilon_1, \varepsilon_2}$
Umjetni akcelerogram	MSB	150	45	0.30	64	15	0.23	11.6	5.5	0.47	0.055	0.029	0.53
	MSSB	173	107	0.62	39	17	0.44	7.6	4.4	0.58	0.850	0.460	0.53
Akcelerogram Petrovac	MSB	120	85	0.71	51	35	0.69	12.1	5.7	0.47	0.058	0.027	0.47
	MSSB	142	80	0.56	28	13.5	0.48	7.6	4.5	0.59	0.870	0.460	0.53
Akcelerogram Ston	MSB	16.2	16.5	1.02	6.8	5.5	0.81	6.5	5.2	0.80	0.031	0.023	0.74
	MSSB	33.6	32	0.95	3.2	3.7	1.16	3.7	3.7	1.00	0.415	0.380	0.92
Akcelerogram B. Luka	MSB	12	6.5	0.54	4.4	1.7	0.39	5.8	4.1	0.71	0.025	0.018	0.72
	MSSB	21	14.5	0.69	1.4	2.3	1.64	2.8	2.4	0.86	0.320	0.220	0.69

$u_1, v_1, v_2, a, \varepsilon_1, \varepsilon_2$  ...maksimalne vrijednosti za krutu podlogu

$u_1^*, v_1^*, v_2^*, a^*, \varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*$  ...maksimalne vrijednosti za sloj oblutaka

## 6. Zaključak

Na temelju rezultata eksperimentalnih istraživanja ponašanja dvaju modela zgrada oslonjenih na krutu podlogu i podloge od kamenih oblutaka, izloženih ubrzanju četiri različita horizontalna akcelerograma s napreznjima konstrukcije u elastičnom području, može se zaključiti sljedeće:

- U odnosu na oslanjanje temelja na krutu podlogu, uporaba sloja oblutaka ispod temelja rezultirala je povoljnijim odgovorom modela zgrada na seizmička ubrzanja. Efikasnost sloja oblutaka ponajprije je ovisila o tipu apliciranog akcelerograma i krutosti modela te, manjim dijelom, o usvojenoj debljini sloja i frakciji oblutaka.
- Najmanje smanjenje deformacija/napreznja u stupu modela zgrade neposredno iznad temelja za akcelerograme AA, AP, AS i ABL iznosilo je 47%, 53%, 26%, 28% kod modela zgrade MSB i 47%, 47%, 8%, 31% kod modela zgrade MSSB.
- Smanjenje horizontalnog pomaka vrha modela zgrade za akcelerograme AA, AP, AS, ABL iznosilo je 70%, 29%, 0%, 46% kod modela zgrade MSB i 38%, 44%, 5%, 31% kod modela zgrade MSSB.
- Potrebna su daljnja istraživanja predloženog koncepta seizmičke izolacije kako bi se dobili još vjerodostojniji zaključci u pogledu njegove efikasnosti i praktične primjene.

## Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost pod projektom Seizmička izolacija osnove građevine upotrebom prirodnih materijala - testiranje potresnom platformom i numeričko modeliranje [IP-06-2016-5325]. Rad doktoranda financirala je Hrvatska zaklada za znanost putem Projekta razvoja karijera mladih istraživača - izobrazba novih doktora znanosti“. Projekt je sufinancirala Europska unija, u okviru OP-a „Učinkoviti ljudski potencijali 2014-2020 iz sredstava ESF-a. Autori su zahvalni na potpori.

## Literatura

- [1] Tsang, H.H.: Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*; 37(2), pp. 283-303, 2008, doi.org/10.1002/eqe.756
- [2] Radnić, J., Grgić, N., Matešan, D., Baloević, G.: Shake table testing of reinforced concrete columns with different layout size of foundation, *Materialwissenschaft und werkstofftechnik*; 46, pp. 348-367, 2015, doi.org/10.1002/mawe.201500410
- [3] Xiong, W., Li, Y.: Seismic isolation using granulated tire–soil mixtures for less-developed regions: experimental validation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*; 42, pp. 2187–2193, 2013, <https://doi.org/10.1002/eqe.2315>
- [4] Patil, S.J., Reddy, G.R., Shivshankar, R., Babu Ramesh, Jayalekshmi, B.R., Kumar Binu.: Seismic base isolation for structures using river sand, *Earthquakes and Structures*,10(4): pp. 829-847, 2016, doi.org/10.12989/eas.2016.10.4.829
- [5] EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance- Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004. Brussels: European Committee for Standardization



## Ponašanje ciklički opterećenog spoja u kutu drvenog okvira izvedenog ulijepljenom šipkom

Jure Barbalić<sup>1</sup>, Vlatka Rajčić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, {jbarbalic; vrajcic}@grad.hr

### Sažetak

Prilikom projektiranja konstrukcija u potresnim područjima, često se zahtijeva rješenje kojim se postiže povećanje krutosti i nosivosti na seizmička opterećenja uz minimalno povećanje mase konstrukcije. Trenutna istraživanja Sveučilišta u Zagrebu, koja se obavljaju u suradnji sa Sveučilištem u Ljubljani, razvijaju posebnu vrstu visokoduktinog hibridnog panela sastavljenog od drvenog okvira s ispunom od nosivog lameliranog stakla, koji, pored nosivosti i krutosti, nudi i visoki stupanj disipacije potresne energije. Iako seizmičko ponašanje ovog konstruktivnog elementa značajno ovisi o dimenzijama pojedinih segmenata panela, kao i fizikalnim karakteristikama materijala, sama nosivost pak, ponajviše je definirana ponašanjem spoja prečke i stupa okvira. Prethodnim istraživanjima određen je optimalni način spajanja – ulijepljenom šipkom. U radu su predstavljena daljnja istraživanja, provedena u sklopu HRZZ projekta VETROLIGNUM. Ispitani su ciklički opterećeni uzorci s različitim promjerima šipki i mjestima upinjanja elemenata stupa te su predstavljeni rezultati i dan kritički osvrt.

*Ključne riječi: drvo, okvir, ulijepljene šipke, potres, seizmika, Eurokod 8*

### The behavior of the cyclic loaded joint in the corner of a timber frame made of glued-in rods

#### Abstract

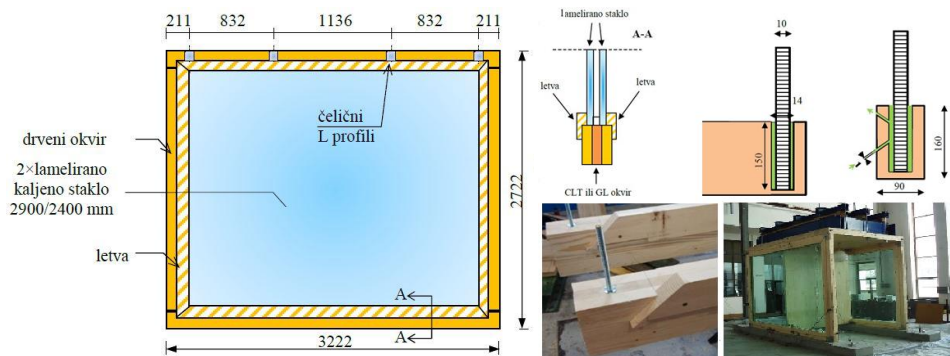
During the design of structures in seismic areas, a solution which provides increase of rigidity and seismic capacity with minimal increase of structural mass is often required. Current research at the University of Zagreb, performed in cooperation with the University of Ljubljana, is leading to the development of high-ductility hybrid panel made of timber frame with laminated glass infill, which, in addition to strength and stiffness, is also characterized by high level of seismic energy dissipation. Although the seismic behavior of this element significantly depends on dimensions of individual panel segments, as well as on material physical characteristics, bearing capacity is predominantly defined by behavior of girder-column joint. Previous research has determined the optimal type of joint – with the glued-in rod. Further research, done under CSF project VETROLIGNUM, is presented in the paper. Samples with different rod diameters as well as with different position of column fixed restraint were tested under cyclic loading. Results are presented and discussed.

*Keywords: timber, frame, glued-in rods, earthquake, seismic, Eurocode 8*

## 1. Uvod

Iako je drvo kao konstruktivni materijal prepoznat od samih početaka ljudskog postojanja, ono i danas nosi epitet poželjnog materijala kao energetski i ekološki prihvatljivog, male vlastite težine i relativno velike čvrstoće te posebice prikladnog u pogledu seizmike. S druge strane staklo je u ulozi građevnog materijala relativno novo, čemu je razlog psihološka percepcija stakla kao lako lomljivog, a zatim i nedostatak projektantskih normi. Istraživanja međunarodne istraživačke skupine (Rajčić, Žarnić) dovela su do ideje o razvoju unikatnog visokoduktilnog hibridnog panela sastavljenog od drvenog okvira s ispunom od nosivog lameliranog stakla, koji, osim nosivosti i krutosti, nudi i visoki stupanj disipacije potresne energije [1-3]. Krajnji cilj istraživanja je uvođenje u praksu istraživačko-razvojnih rezultata, dajući time ekonomski opravdano i tehnički lako izvodljivo rješenje za problem vanjskih nosivih transparentnih zidova, čime se umanjuje torzioni učinak kod djelovanja potresa te ojačanja i sanacija postojećih konstrukcija nedovoljne potresne otpornosti.

Ova skupina autora primijenila je nešto drugačiji sustav od ostalih istraživača [1] na području kompozitnih sustava drvo-nosivo staklo, pri čemu je glavna ideja bila da se stakleni paneli ne zalijepe na drveni okvir već umetnu unutar njega. Razvijen je sustav u kojem se prijenos opterećenja odvija preko direktnog kontakta dvaju materijala i sile trenja između njih. Staklo namjerno nije spojeno na drveni element niti mehaničkim spajalima zbog svog krtoq ponašanja i nekompatibilnosti s materijalima poput čelika, ali niti s ljepilima koja bi sprječavala razvoj sile trenja i naposljetku rezultirala krtim lomom stakla. Stoga je velika pozornost dana razvoju detalja spajanja drvenih elemenata o kojem ponajviše ovisi i nosivost panela.



Slika 1. Hibridni panel drvo-staklo autora Rajčić i Žarnić [3]

Istraživanjem [1-3] su ispitane karakteristike praznih okvira te hibridnog panela za koje su varirani rubni uvjeti i načini spajanja elemenata drvenog okvira. Dimenzije uzorka 3.22 m x 2.72 m odgovarale su realnim okvirima koji se ugrađuju u konstrukcije. Spojevi s jednim vijkom u kutu okvira, s dva vijka u kutu okvira te s jednim vijkom i čeličnom nazubljenom pločom pokazali su se kao nedovoljno duktilni. Spoj s jednom ulijepljenom šipkom omogućio je veću plastifikaciju i prijenos većih sila za razliku od prethodnih tipova, te je prihvaćen kao optimalan. U konačnici, pokazalo se da ovakav tip hibridnog panela (Slika 1) značajno

odstupa od ponašanja do sada istraživanih sustava. Do loma, odnosno oštećenja sustava,, dolazi uslijed prekoračenja tlačne čvrstoće drva, odnosno gnječenja, pri čemu se propagacija otkazivanja nastavlja plastifikacijom spojnog sredstva, uz konačno otkazivanje ovisno o rubnim uvjetima (ili tlačno, izbacivanjem središnje lamele ili vlačno, čupanjem šipke). Histerezni odziv pokazao je podatke o vrlo duktilnom ponašanju spoja u kutovima okvira te o izvrsnom načinu trošenja seizmičke energije čemu pridonosi i razvitak sile trenja između drva i stakla.

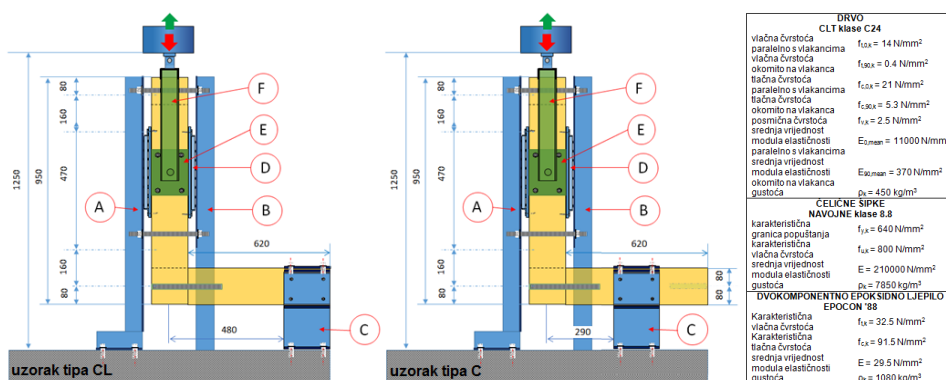
U složenom matematičkom opisu ponašanja sustava [4], kao jedna od nepoznanica pokazalo se ponašanje spoja u kutu okvira, koji pored poprečnih sila u stupu i uzdužnih u gredi, prenosi i momente. U radu su predstavljena daljnja istraživanja, provedena u sklopu HRZZ projekta VETROLIGNUM (IP-06-2016-3811). Ispitani su ciklički opterećeni uzorci s različitim promjerima šipki i mjestima upinjanja elemenata stupa te su predstavljeni rezultati i dan kritički osvrt.

## 2. Ispitivanje ciklički opterećenog kuta drvenog okvira

U ovom je istraživanju razmatrano šest različitih tipova ciklički opterećenih uzoraka. Varirana su tri promjera ulijepljenih šipki i dva mjesta upinjanja elemenata stupa. Sva ispitivanja provedena su u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija Građevinskog fakulteta u Zagrebu.

### 2.1. Priprema uzoraka

Sav materijal za uzorke nabavljen je od ovlaštenih proizvođača te izrezan i sastavljen prema definiranim dimenzijama i uputama (Slika 2). Svi uzorci načinjeni su od križno lameliranog drva, označenog klasom C24 prema EN 338. Uzorci su rezani iz troslojne 8.4 m duge i 2.95 m široke CLT ploče proizvođača *Stora Enso*. Ploča je izrađena od lamela debljine 30 mm s *non-visible* kvalitetom obrade, u skladu s austrijskim standardom Z-9.1-559. Svi uzorci su jednakog poprečnog presjeka, visine 160 mm u i 90 mm širine.



(A i B-čelični okvir, C-čelična papuča, D-čelični valjci, E-čelične ploče, F-čelično sedlo)

**Slika 2.** Dimenzije uzorka kuta drvenog okvira s karakteristikama korištenog materijala

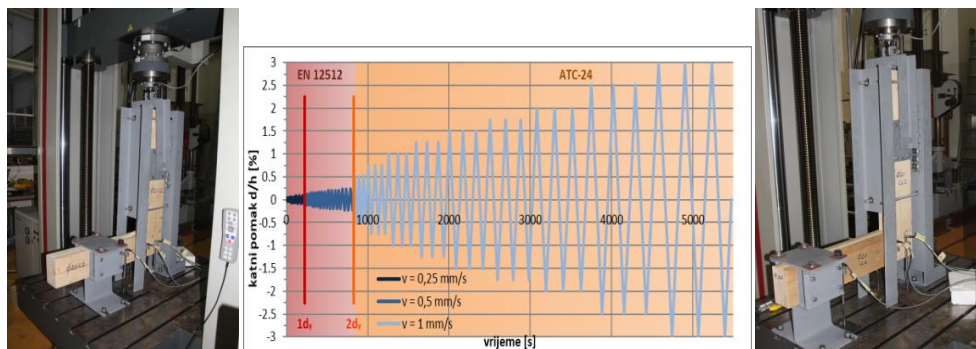
Segmenti stupova duljine su 620 mm, a grede 950 mm. U središtu poprečnog presjeka stupa u srednjoj lameli u smjeru okomitom na vlakanca, probušena je rupa dubine 160 mm,

kao i kroz cijelu visinu poprečnog presjeka grede (sa središtem 80 mm od ruba elementa), u srednjoj lameli u smjeru paralelno na vlakanca.

Budući da je cilj ispitivanja bio procijeniti ponašanje i nosivost, kao i procijeniti mod otkazivanja spoja u kutu okvira, karakteristike čelične šipke morale su biti takve da ona ostane u elastičnom području prilikom otkazivanja samog spoja. U skladu s tim, varirane su navojne šipke M10, M14 i M20 klase 8.8. Sve su šipke duljine 320 mm.

Kao adheziv, korišteno je dvokomponentno epoksino ljepilo EPOCON '88 proizvođača KGK (u tehničkom listu dane su karakteristike ljepila pri temperaturi od 20 °C). Kako bi se rezultati ispitivanja mogli usporediti, geometrijske karakteristike lijepljenja iste su za sve uzorke. Definirana je efektivna duljina sidrenja od 160 mm u svakom elementu (stupu i gredi) te debljina veznog sloja od 1 mm.

Priprema uzoraka provedena je u istom laboratoriju u kojem je provedeno ispitivanje. Srednja vrijednost vlažnosti drva (mjereno tijekom pripreme uzoraka), pri prosječnoj temperaturi od 28 °C, iznosila je 11 %. Uzorci su njegovani u laboratorijskim uvjetima sedam dana prije ispitivanja, tijekom kojih nije primijećeno značajno skupljanje adheziva niti neusklađenost uzorka. Ukupan broj od 15 uzoraka tipa C i 14 tipa CL laboratorijski je ispitan.



Slika 3. Postavke ispitivanja i protokol opterećenja

## 2.2. Ispitna metoda

U svrhu dobivanja što realnije slike ponašanja spoja u kutu drvenog okvira, korišten je isti protokol ispitivanja kao i za hibridne panele, pri čemu se protokol cikličkog opterećenja zasnivao na dijagramu sila-pomak za panel monotono opterećen do loma. Kao polazni podatak za protokol opterećenja, iz dijagrama su određene točke popuštanja po metodi Yamasura i Kawai (metoda za ispitivanje posmičnih drvenih zidova). Pomak uslijed popuštanja  $d_y$  predstavlja osnovni podatak za konstruiranje amplituda cikličkog opterećenja, pri čemu je protokol opterećenja usklađen s normom EN 12512 [5] za male amplitude, odnosno s normom ATC-24 [6] za velike amplitude. Za različite uzorke panela izmjerene su slične vrijednosti sile popuštanja  $F_y$ , stoga je odlučeno poštovati jedan protokol opterećenja za sve uzorke (Slika 3).

Nakon što je određen pomak prilikom popuštanja  $d_y=3.1$  mm, u skladu s EN 12512 definirane su veličine amplituda koje se povećavaju za  $0.25 \cdot d_y$  u svakom sljedećem koraku. Nakon što pomak dosegne vrijednost od  $2 \cdot d_y$ , protokol opterećenja slijedi standardnu ATC-

24 proceduru gdje se u svakom sljedećem koraku amplituda povećava za  $0.0025 \cdot h$ , odnosno za  $0.05 \cdot h$  nakon što pomak dosegne 2 % katne visine. U ovom slučaju, katna visina jednaka je visini panela od 2722 mm. Brzina nanošenja opterećenja, definirana kao promjena pomaka u jedinici vremena, također se mijenja s porastom pomaka. Brzina je jednaka 0.25 mm/s dok pomak ne dosegne vrijednost od  $d_y$ , nakon čega raste na 0.5 mm/s. Kada pomak dosegne vrijednost od  $2 \cdot d_y$ , brzina poprima konačnu vrijednost od 1 mm/s. Za svaki pojedini korak, pomak (amplitudu) je potrebno ostvariti tripot.

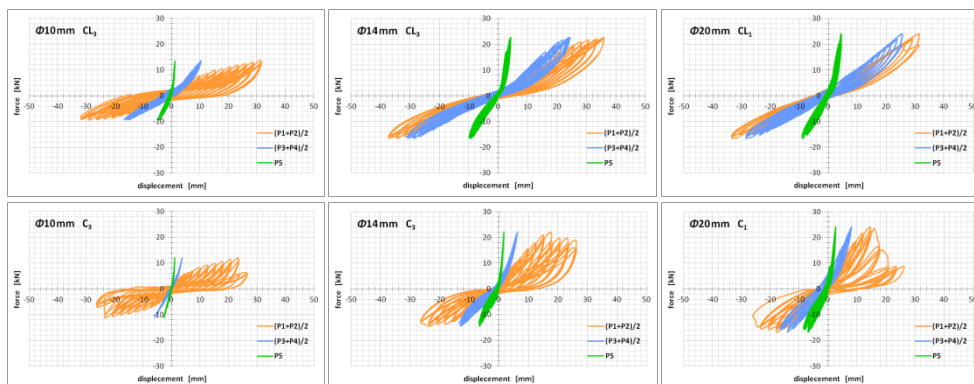
### **2.3. Postavke ispitivanja**

U svrhu ispitivanja izrađeno je posebno postolje (Slika 3), u koje je kut okvira postavljen tako da je zaokrenut za  $90^\circ$ . Segment stupa fiksiran je vodoravno, a segment grede postavljen je kao vertikalno pomičan unutar ravnine okvira. Razmatrane su dvije postavke ispitivanja s različitim uvjetima oslanjanja stupa kako bi se istražio utjecaj kraka sile (momenta savijanja) na nosivost i mod otkazivanja spoja. Upeti ležaj formiran je kao 200 mm dugačka čelična papuča postavljena na vanjskom rubu stupa u prvom, i u sredini visine stupa u drugom slučaju. Van ravnine, greda je s obe strane pridržana čeličnim pločama koje su pak trnovima povezane za sedlo spojeno na klip hidrauličke preše. Zglobne veze između ovih elemenata formirane su kako bi se osigurao centrični unos opterećenja (pomaka). U ravnini, greda je pridržana čeličnim okvirom oslonjenim na bazu. Kako bi se osigurala pravilnost vertikalnog pomaka grede, kao i nesmetano klizanje elementa po pridržanju, s obe strane između grede i čeličnog okvira postavljeni su čelični valjci (roleri). Ovakav koncept osmišljen je kako bi se simuliralo ponašanje kuta okvira usljed djelovanja horizontalnog pomaka međukatne konstrukcije oslonjene na gredu okvira, pri čemu vrijedi pretpostavka da na okvir djeluje samo horizontalna sila (djelovanja vjetra ili potresa).

Sva laboratorijska ispitivanja provedena su upotrebom elektromehaničke preše *Zwick Roell Z600E* s kontrolom vertikalnog pomaka u brzini od 0.00005 do 3000 mm/min. Sila koja se javljala prilikom unosa pomaka mjerena je 600kN statičkom dozom sa standardnom devijacijom manjom od 1 % (klasa 1). Relativni pomak sa svake strane pojedinog elementa, kao i pomak ležaja, mjereno je upotrebom LVDT senzora *HBM WA 10* (klasa 0.5).

### **3. Rezultati ciklički opterećenog kuta drvenog okvira**

Karakteristične vrijednosti ponašanja spoja u kutu okvira dane su na Slici 4. Nosivost spoja izvedenog ulijepljenom šipkom M14 veća je za 30 u odnosu na spoj izveden šipkom M10 te 10 % manja u odnosu na spoj izveden šipkom M20. Uvažavajući spomenute rezultate, kao i činjenicu da histerezna petlja spoja prikazuje ponajbolji omjer duktilnosti i nosivosti za promjer šipke M14, zaključuje se da je optimalna za izvedbu tipskog spoja u kutu okvira. Modovi otkazivanja spoja razlikovali su se ovisno o promjeru šipke. Kod šipke M10 do loma dolazi vlačnim otkazivanjem šipke neovisno o rubnim uvjetima, dok kod šipki M14 i M20 do loma dolazi uslijed prekoračenja tlačne čvrstoće drva pri čemu se propagacija otkazivanja nastavlja plastifikacijom spojnog sredstva (slično kao kod panela), uz konačno otkazivanje ovisno o rubnim uvjetima, ili tlačno, izbacivanjem središnje lamele (u stupu kod CL tipa uzorka, odnosno u gredi za C tip uzorka) ili vlačno, čupanjem šipke.



Slika 4. Karakteristični dijagrami histereznog odaziva kuta drvenog okvira

## 4. Zaključak

Mehanički sastavljen panel drvo-staklo primjenjiv je u gradnji drvenih objekata pri čemu nosivo staklo preuzima većinu vertikalnog opterećenja, dok u međusobnoj interakciji konstruktivnih elementa dolazi do preraspodjele horizontalnih opterećenja. Korištenje ulijepljenih čeličnih navojnih šipki nominalnog promjera M14 pokazalo se kao optimalan način spajanja elemenata drvenog okvira u pogledu nosivosti i duktilnosti. Ovim ispitivanjem dobiven je bolji uvid u ponašanje spoja s jednom šipkom koja preuzima moment savijanja, kao i bolji uvid u utjecaj fleksijske i posmične krutosti na mod otkazivanja. Nadogradnjom prethodnih istraživanja na temu ulijepljenih šipki, izvest će se matematički izraz za dva aspekta – statički, čiji je cilj odrediti ukupnu nosivost spoja, te dinamički, čiji je cilj odrediti histerežno ponašanje spoja uz poznate krutosti materijala. Takvim bi se istraživanjem definirali izrazi koji bi olakšali primjenu inovativnog sustava u projektantskoj praksi.

## Literatura

- [1] Rajčić, V., Žarnić, R.: Racking Performance of Wood-Framed Glass Panels, Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), Auckland, New Zealand, 2012.
- [2] Rajčić, V., Žarnić, R.: Highly Energy Dissipative and Ductile Timber-Glass Hybrid Element, Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), Vienna, Austria, 2016.
- [3] Štepinac, M., Rajčić, V., Žarnić, R.: Kompozitni sustavi drvo-nosivo staklo u potresnom okruženju, Građevinar, 68 (3), pp.211-219, 2016., doi: 10.14256/JCE.1505.2015.
- [4] Barbalić, J., Rajčić, V., Žarnić, R.: Numerical Evaluation of Seismic Capacity of Structures with Hybrid Timber-Glass Panels // Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), Vienna, Austria, 2016.
- [5] European Committee for Standardization (CEN): Timber Structures; Test Methods; Cyclic Testing of Joints Made with Mechanical Fasteners (EN 12512), Brussels, Belgium: 2001.
- [6] Applied Technology Council (ATC): Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures (ATC-24), Redwood City, CA, USA, 1992.

## **Analiza turističkog potencijala Parka prirode Biokovo: primjeri lokaliteta Podglogovik i Rastovac**

**Bruno Bartulović<sup>1</sup>**

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

### **Sažetak**

Cilj je ovog rada analiza turističkih potencijala Parka prirode Biokovo te prikaz prijedloga daljnjeg razvoja. U radu su razloženi ključni aspekti i čimbenici u razvoju održivosti kao osnove turizma u ekološki osjetljivim i zakonski zaštićenim područjima, kao što su parkovi prirode. Ekoagroturizam je prepoznat kao moguća razvojna smjernica turizma, a obiteljska poljoprivredna gospodarstva su prepoznata kao nositelji turističkog razvoja. Na temelju analize postojećih potencijala te u skladu s Prostornim planom Parka prirode Biokovo, određene su optimalne lokacije za razvoj turizma. U članku je prikazan prijedlog razvoja dva, međusobno različita lokaliteta, Donji Rastovac i Podglogovik.

*Ključne riječi: Park prirode Biokovo, turizam, održivost, agroturizam*

### **Analysis of the tourist potential of the Biokovo nature park: case studies of Podglogovik and Rastovac**

#### **Abstract**

The aim of this paper is an analysis of tourism potential of Biokovo Nature Park and to present the suggestions for further development. The paper discusses aspects and certain key factors in the development of sustainability as the basis of tourism in environmentally sensitive and legally protected areas, such as nature parks. Eco-agrotourism has been recognized as a possible developmental guideline for tourism while family farms have been recognized as the driving force for tourism development. The optimal locations for the development of tourism are defined based on the analysis of the existing potentials and in accordance with the Spatial Plan of the Nature Park Biokovo. The article presents a proposal for the development of two mutually different localities Donji Rastovac and Podglogovik.

*Keywords: Biokovo nature park, tourism, sustainability, agrotourism*



## 1. Uvod

Turizam, kao profitabilna djelatnost, teži kontinuiranom te često eksponencijalnom rastu. Nekontrolirani i neplanski turizam iscrpljuje resurse, opterećuje infrastrukturne sustave, stvara konflikte u ekonomskim, a zatim i društvenim sferama te onemogućava kontrolu kriznih situacija. Ipak, brzi rast obilježen je i sposobnošću turizma da integrira, razvije i primijeni različite koncepte iz drugih sfera i disciplina [1].

Koncept održivosti se stvorio kao odgovor na iracionalno trošenje prirodnih resursa te zbog negativnog utjecaja na okoliš. Cilj je stvaranje uravnoteženog razvoja i odgovorne eksploatacije. Brutlandska komisija (*World Commission on Environment and Development*) definira održivi razvoj kao "razvoj koji ispunjava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja budućih generacija da ispune svoje potrebe" (UN, *Our Common Future*). Važnost održivosti je vidljiva i u inicijativi Ujedinjenih naroda za 2030. godinu u kojoj je održivost centralna paradigma (2030. Agenda), a za prioritete turizma postavlja se: promicanje sigurnosti, upotreba inovativnih tehnologija i prihvaćanje agende održivosti (*United Nations World Tourism Organization*, 2017). Pojam održivosti veže se za mnoga međuovisna polja čovjekova djelovanja, no najčešće se promatra aspektima ekološke i ekonomske održivosti. Zbog ovisnosti turizma o ekološkim čimbenicima lokacije [2] i o globalnim ekonomskim trendovima [3], koncept održivosti primjenjuje se i u turizmu.

Fokus ovog rada je analiza razvoja te prijedlog organizacije turističkih potencijala u Parku prirode Biokovo (PPB) kroz aspekt održivosti s posebnom primjenom na lokacijama Podglogovik i Rastovac. Dodatno je prikazan prijedlog rješenja za dvije lokacije baziran na razvoju ekoagroturizma.

Iako su potencijali ruralnog turizma nedovoljno prepoznati u Hrvatskoj, s vremenom dobivaju na značenju [4]. **Agroturizam** obuhvaća širok spektar značenja s obzirom na kontekst u kojem se koristi, no općenito podrazumijeva aktivnosti bazirane na farmama ili rančevima. FAO (*Food and Agriculture Organization*) uvodi pojam ekoagroturizma kao kombinaciju ekoturizma koji se temelji na aktivnostima obiteljskih poljoprivrednih gospodarstava kroz kombiniranje prirodnih (netaknutih) i kultiviranih ekosistema uklopljenih u prepoznatljivi turistički proizvod [5]. **Ekološki agroturizam** je potencijalna razvojna smjernica, s obzirom na reljefne, klimatske, kulturološke i sociološke odlike Biokovskog prostora. [6]

Agroturizam se može razvijati unutar granica nacionalnih parkova [7], parkova prirode, ali i na **obiteljskim poljoprivrednim gospodarstvima** koja posluju na načelima ekološke poljoprivredne proizvodnje. U radu [8] autori su zaključili da se poduzetnici, bez potpore vlade, prilagođavaju potrebama ekološki osviještenih turista, pod uvjetom da postoji dovoljan broj *ekoturista*. Uza sve to smatraju da lokalne vlasti mogu utjecati na brendiranje *lokaliteta i privlačenje ekoturista* koji bi poticali daljnji razvitak. te da su najbolji uvjeti za provođenje upravo u mjestima s relativno malim turističkim tržištem.

## 2. Formulacija problema

Ustaljeni modeli razvoja temeljeni su na eksploataciji resursa ne uzimajući u obzir njihovu obnovljivosti. Takvo upravljanje resursima rezultira različitim konfliktima. Međuovisnost primarnih polja konflikta može se predočiti dijagramom prikazanim na Slici 1.



Slika 1. Dijagram međuovisnosti sfera

Čovjek je u sukobu s prirodom u dvije dimenzije. Jedna je sukob čovjeka s prirodom; čovjek kultivira, preoblikuje i uništava prirodu radi ostvarivanja boljeg života, a u krajnjem slučaju i opstanka. Druga dimenzija je sukob između društava zbog kontrole i korištenja prirodnih dobara. Održivost se temelji na umanjivanju takvih sukoba [9].

Fundamentalna pretpostavka za uspostavljanje održivosti je kreiranje registra postojećeg stanja. Cilj je obradom tih podataka dobiti pokazatelje za daljnje intervencije. Zbog kompleksnosti varijabli u turizmu, teško je govoriti o potpuno empirijski funkcionalnom modelu [10]. No postoje modeli različite kompleksnosti koji analiziraju raznovrsne podatke te ukazuju na potencijale razvoja. Identifikacija **tipa** turizma adekvatnog za svaku lokaciju zahtijeva znanje geografskih, socijalnih, kulturnih i ekonomskih specifičnosti. Na primjeru istraživanja za područje Ozana-Topolita [11] prezentirana je metoda analize specifičnosti kojom je moguće odrediti odgovarajući tip turizma.

Nadalje za osiguravanje održivosti turizma na nekom području potrebno je procijeniti **granično opterećenje** koje to područje može podnijeti, tj. maksimalni kapacitet turista koje mjesto može primiti s podnošljivim negativnim posljedicama [12].

Moguće je više indikatora održivog razvoja turizma dobivenih različitim istraživanjima pretočiti u jedan pokazatelj održivosti [13].

Jedan od ciljeva je i prepoznati **nositelje** razvoja te uskladiti djelovanje pojedinaca i organizacija u ostvarivanju održivosti. U svom članku Dedeker demonstrira mrežu sudionika koju je organizirao jedan, privatni inicijator [14]. Razvojem svijesti o ekologiji, društvo diktira norme ponašanja, a ekološki prihvatljivo ponašanje je norma današnjice. *Postturistički* gosti [15] favoriziraju upravo spomenute *bottom-up* inicijative koje su, u odnosu na masovni turizam, društveno prihvatljivije zbog percepcije autentičnosti [16].

Uspješnost održivog turizma ovisi o identifikaciji odgovarajućeg tipa turizma, o određivanju turističkog kapaciteta te o nositeljima razvoja i njihovoj organizaciji.

Razni postojeći tipovi turizma mogu biti održivi, a pojavljuju se i novi. Neki od novih tipova su: ekološki turizam (ekoturizam), zeleni turizam, meki, ruralni turizam, agroturizam, *community* turizam, solidarni i odgovorni turizam [17]. Budući da Hrvatska ima bogate prirodne potencijale i uvjete za razvoj ekoturizma, sve se više upravo to ističe u turističkoj ponudi.

Petrić daje širu analizu razvoja turizma u PP Biokovo s prijedlozima [18] koji su korišteni kao smjernice u ovom radu.

## **2.1. Park prirode Biokovo**

Javna institucija "Park prirode Biokovo" osnovana je 1981. Pokriva površinu od 19550 ha obuhvaćajući čitav planinski lanac ukupne duljine 25 km. Najveći vrh, Sv. Jure je visok oko 1767 m. Planina se proteže na samo 2-3 km od obale. Viši predio planine je valoviti plato s mnoštvom vrtača. Čitava planina građena je od karbonatnih stijena, većinom vapnenca. Reljef je formiran vertikalnim slijevanjem vode, što je proizvelo mnoge špilje, jame, vrtače i druge reljefne oblike tipične za krš, bogate endemskom faunom. Najrasprostranjenije su šume bukve i dalmatinskog bora. Uska zona između planine i mora većinom je kultivirana zemlja (masline i vinogradi te alepski bor). Uz Velebit, Biokovo je najvažniji centar endemizma u Hrvatskoj s veoma bogatom florom (preko 1600 vrsta). Biokovo ima čitav raspon mediteranskih vrsta, od planinskih do primorskih, na jako kratkoj udaljenosti. Uz navedeno je bitno spomenuti značajna paleontološka i arheološka nalazišta u parku [18].

Ruralni biokovski krajolik obiluje bogatim livadama i pašnjacima krške morfologije [19]. Lokalno se stanovništvo oduvijek bavilo ekstenzivnim stočarstvom periodično boraveći na planini u vrijeme ispaše. U podnožju planine s primorske strane mediteranske kulture, kultivirana je i obrađivana zemlja, a s kontinentalne strane, fokus je bio na izdržljivijim jednogodišnjim biljkama [20].

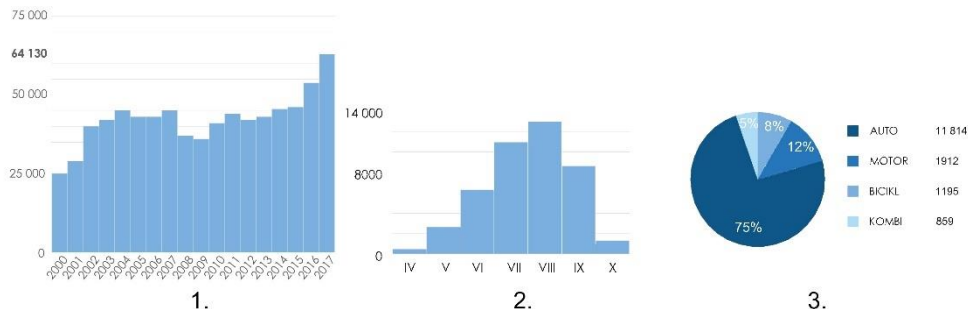
## **3. Metodologija**

### **3.1. Analiza postojećeg stanja u Parku prirode Biokovo**

Područje Biokova u velikoj mjeri ima očuvanu floru i faunu. Razlozi su depopulacija i odumiranje stočarstva kao primarne ekonomske djelatnosti. Posjećenost Parka prati trendove posjećenosti RH, značajan pad kao posljedica ekonomske krize iz 2008. godine te snažan uzlet od 2015. godine. Park prirode Biokovo jedan je od posjećenijih parkova prirode u RH, no postoje prilike za stvaranje kvalitetnije ponude.

Posjeti su većinom jednodnevni izleti manjih grupa ili individualne planinarske ekskurzije. Postoji infrastruktura za potrebe posjetitelja: info i prezentacijski centri, botanički vrt, poučne staze te planinarske staze. Uza sve to postoje studije o gradnji žičare od Makarske do planinarskog doma na Vošću te su provedene preliminarne studije o izgradnji skijališta na sjevernim padinama Biokova. S obzirom na kompleksnost i klimatske prilike, vjerojatnost realizacije projekata ostaje vrlo mala. Pristupačnost planinskim dijelovima parka je otežana

zbog nedostatka kvalitetne cestovne infrastrukture. Jedina asfaltirana cesta je nedovoljne širine za prihvat dvosmjernog prometa. Otegotna okolnost je struktura prometa s visokom zastupjenošću osobnih automobila (Slika 2).



**Slika 2.** Statistički podatci: 1. broj posjetitelja, 2. broj posjetitelja po mjesecima za 2014, 3. udio tipova vozila za 2014. [21]

U samom Parku ne postoje smještajni kapaciteti za produljeni boravak koji bi omogućili interaktivniji i emotivno sveobuhvatniji turizam. Problem, povezan s prethodnim, je nesređenost zemljišnih knjiga. Zainteresirani poduzetnici spriječeni su u investiranju zbog kompleksnosti rješavanja vlasničkih odnosa. Također, značajni nedostatak u razvoju PPB-a je nepostojanje električne mreže te vodovoda i kanalizacije adekvatne za prihvat gostiju. Korak naprijed na ovom polju je donošenje Prostornog plana Parka prirode Biokovo [22]. Definirani su dopušteni okviri individualne gradnje, te su određene lokacije građenja većih zahvata u prostoru Parka. S druge strane u svrhu očuvanja okoliša, mogućnosti gradnje u planinskom predjelu Parka su skromne. Dopušteno je obnavljanje postojećih objekata tj. pastirskih stanova tradicionalnim metodama. Ekonomičnost takvih obnova s obzirom na površinu objekta je vrlo upitna. U podnožju, u okviru postojećih naselja, uspostavljene su građevinske zone s mogućnosti slobodnije prostorne intervencije.

### 3.2. Analiza potencijalnog razvoja i budućih trendova

Potrebno je pronaći odgovarajući **tip turizma** koji će biti smjernica daljnjeg razvoja. Također je potrebno profilirati i posjetitelje koji se očekuju. S obzirom na to da je Biokovo zaštićeno kao park prirode, logično je težiti ka privlačenju ekoturista. Uz već postojeći i relativno razvijeni avanturistički turizam, potrebno je razvijati ekoagroturizam. U zadnjih nekoliko godina postoje određeni pomaci na tom polju zahvaljujući mjerama potpore iz EU fondova za ruralni razvoj (Mjera 6.4. Razvoj nepoljoprivrednih djelatnosti u ruralnim područjima).

Ključno u razvitku odgovornog ekoagroturizma je omogućiti višednevni boravak. Posljedice mogu biti opasne za prirodu u PPB-u, no prihodi od potencijalnih noćenja i aktivnosti mogu pridonijeti u aktivnom očuvanju Parka, a istovremeno povećati kvalitetu turističke ponude. S obzirom na osobine ekoturista, pretpostavlja se da bi negativan utjecaj na zaštićeni okoliš Parka prirode bio sveden na minimum. Ključni preduvjet ovoj mjeri je određivanje **turističkog kapaciteta** u svrhu ograničavanja negativnih učinaka. Nemaju sva područja iste kapacitete stoga je ključno pronaći odgovarajuće lokacije i odrediti maksimalni broj posjetitelja. Svih pet analiziranih lokacija imaju svoje prostorne i prirodne specifičnosti.

Nadalje potencijalni **nositelji razvoja** mogu biti obiteljska poljoprivredna gospodarstva. Male fleksibilne zajednice ili pojedinci pokazuju izdržljivost i otpornost na šokove u razvoju turizma koji se podudara s njihovim životnim stilom [23].

U skladu s prostornim planom, na temelju analize odabrano je pet potencijalnih lokacija unutar PPB-a (Slika 3) i dan je prijedlog razvoja za dvije lokacije. U razmatranju potencijalnih lokacija u obzir je uzeto stanje prirodnog ambijenta, prometna povezanost, dopušteni opseg gradnje po Prostornom planu PPB-a te mogućnost priključka na energetska i vodovodna mreža. Istražene su i evidentirane atrakcije: prirodne atrakcije kao špilje i šume, arheološka nalazišta te povijesni graditeljski sklopovi (pastirska naselja i suhozidi). Pri odabiru lokacije razmatrani su i postojeći ugostiteljski kapaciteti.

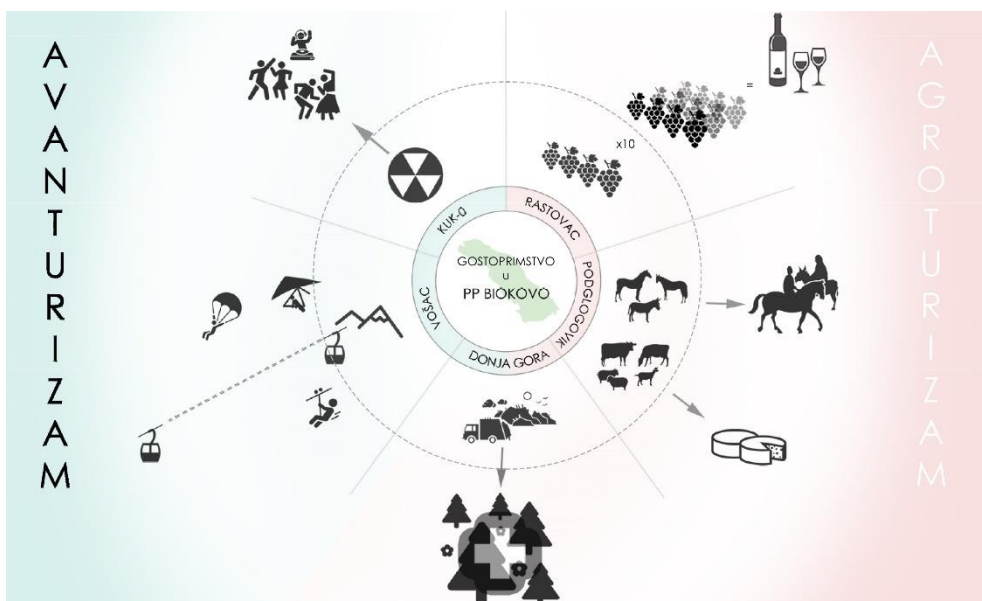


**Slika 3.** Prikaz analiziranih lokacija u PPB-u

Donji Rastovac i Podglogovik su se pokazali kao optimalne lokacije za demonstraciju prijedloga rješenja. Rastovac se nalazi u podnožju planine u blizini priključka na autoput i tunela za Makarsku. Privatni investitor je sagradio nekoliko ugostiteljskih objekata i zasadio vinograd. Šire područje je prošarano mrežom suhozida koji su trenutno zapušteni, ali ukazuju na nekad razvijenu poljoprivredu. Podglogovik je planinska lokacija locirana na platou kojem se pristupa serpentinom uz strme padine Biokova. Ovdje se drugi privatni investitor fokusirao na razvoj ranča s domaćim životinjama. Uz ugostiteljske objekte na širem području ima više atrakcija: napušteno pastirsko naselje, poučna staza *Topnički put*, pretpovijesne gomile i vidikovac s pogledom na obalu. Razvoj turizma na obje lokacije baziran je na ekoagroturizmu, no s obzirom na različiti karakter područja i postojeće resurse, koncept agroturizma razvijen je u različitim smjerovima.

### **3.3. Prijedlog rješenja za Podglogovik i Rastovac**

Za svih pet potencijalnih lokacija dat je koncept razvoja turizma (Slika 4). Turistička ponuda Podglogovika bazirana je na aktivnostima povezanim s domaćim životinjama, dok je ponuda Rastovca bazirana na aktivnostima povezanim s vinogradarstvom.



**Slika 4.** Grafički prijedlog razvojnih smjernica (postojeći potencijali su unutar crtkanog kruga, potencijali razvoja su naznačeni van kruga)

**Podglogovik** (Slika 5) je funkcionalno zamišljen kao difuzni hotel. Jedna centralna uslužna zgrada opskrbljivala bi smještajne objekte razmještene po širem planinskom području. Smještaj je robinzonskog karaktera i predviđen je za parove ili umirovljenike željne privatnosti. Dostava osnovnih potrepština i namirnica bi se obavljala pomoću električnih *dron* letjelica za opskrbu koje bi polijetale iz centra u Podglogoviku. Unatoč nepristupačnosti objekata, gostima bi odmah bio osiguran topli obrok ili čista posteljina. Objekti za boravak su energetski samodostatne predgotovljene jedinice koje se dopremaju ili sastavljaju na licu mjesta. Objekti površinom odgovaraju starim pastirskim stanovima te se smještaju u njihov suhozidni omotač (ruševinu) u svrhu poboljšane termoizolacije. Ujedno takav način intervencije osigurava da broj dugotrajnih posjetitelja nije veći od nekadašnjeg maksimalnog broja stanovnika. Takvo ograničenje pozitivno ograničava turistički kapacitet lokacije. Na samom području pastirskog naselja Podglogovik nalazio bi se veći broj takvih jedinica i tu je predviđena svojevrsna farma temeljena na konceptu pregonskih pašnjaka. U takvom sustavu predviđen je broj životinja i površina koja je potrebna za njihovo uzdržavanje. Površina se podijeli u nekoliko pašnjaka i životinje se premještaju iz jednog u drugi omogućavajući da se vegetacijski sloj oporavi. U konkretnom slučaju ograda je izvedena suhozidnom tehnikom, ali s ravnim i kružnim tlocrtnim oblicima u svrhu razlikovanja od postojećih *organskih* suhozida. Po obodu pašnjaka je staza koja povezuje različite sadržaje (info staza, pretpovijesne gomile, piknik), a kontakt sa životinjama je kontroliran.



Slika 5. Lijevo: Podglogovik, pregoni pašnjaci; desno: smještajna jedinica

**Rastovac** (Slika 6) je zamišljen kao više sklopova sastavljenih od nekoliko smještajnih jedinica. Smještaj je projektiran za obitelji s djecom. Svaka jedinica je dostatna za najmanje četiri osobe. Urbanistički postav i koncepcija građevina inspirirani su lokalnim tipologijama i projektirani da potiču interakciju posjetitelja. Razvoj lokaliteta uključuje reparaciju postojećih suhozida i sadnju vinograda te gradnju vinarije za proizvodnju i plasman autohtonih vina. Postojeće, prirodno formirane vrtače okružile bi se suhozidnim terasama. Uz rub svake vrtače postavljena su po dva smještana sklopa. Kultivirane vrtače su u kontrastu s nekontroliranom vegetacijom koja ih okružuje. Namjena postojećih zgrada predviđena je za prijem, servis i administraciju.



Slika 6. Lijevo: situacija Rastovac; desno: prikaz smještajnog sklopa



## 4. Zaključak

Prema analiziranim podacima evidentno je da se turizam u Parku prirode Biokovo kreće u pozitivnom smjeru. No nedostaci u turističkoj ponudi kao što je nemogućnost dugotrajnijeg boravka, sprječavaju daljnji razvoj. Promicanje ponude bazirane na ekoagroturizmu jedna je od ključnih razvojnih strategija za turizam u zaštićenom području Parka. Nositelji razvoja agroturizma mogu biti obiteljska poljoprivredna gospodarstva koja se bave ekološkom poljoprivredom ili stočarstvom. Emocionalni doživljaj prirode može se pojačati dužim periodom boravka u smještajnim uvjetima specifičnim za Park prirode Biokovo. Na primjeru Donjeg Rastovca i Podglogovika prezentirana su moguća rješenja smještaja i daljnjeg razvoja agroturizma u granicama Parka prirode. Održivost je osnovna pretpostavka predloženog razvoja turističkih potencijala. To podrazumijeva precizno analiziranje, ograničavanje i praćenje turističkih kapaciteta lokaliteta.

## Literatura

- [1] Sharpley, R., Telfer, D.J.: *Tourism and Development: Concepts and Issues*, Channel View Publications, 2014
- [2] Urry, J.: *Consuming places*. Taylor & Francis, 1995.
- [3] Mosedale, J.: *Political economy of tourism: A critical perspective*, Routledge, 2010.
- [4] Demonja, D.: *The Overview and Analysis of the State of Rural Tourism in Croatia*, Sociologija i prostor: Vol.52 No.1 (198), 2014, doi: 10.5673/sip.52.1.4
- [5] Čurić, K.: *Promišljanje razvoja ekoturizma i ekološke poljoprivrede*, Praktični menadžment, Vol. 1, pp. 98-100, 2010.
- [6] Brčić-Stipičević, V., Petljak, K., Renko, S.: *Ekoagroturizam – pokretač održivog razvoja turizma*
- [7] Călina A., Călina J., Stan, I.: *Research regarding the sustainable development of agritourism in the neighbouring area of Cozia national park, Romania*. *AgroLife Scientific Journal*, Volume 6, Number 2, pp. 33-42, 2017
- [8] He, P., He, Y., Xu, F.: *Evolutionary analysis of sustainable tourism*, *Annals of Tourism Research* 69, pp. 76-89, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.annals.2018.02.002>
- [9] Cifrić, I.: *Sustainable development and the strategy of environmental protection*, *Socijalna ekologija* vol. 9, pp. 233-248, 2000.
- [10] Agyewiaah, E., McKercher, B., Suntikul, W.: *Identifying core indicators of sustainable tourism: A path forward?*, *Tourism Management Perspectives* 24, pp. 26-33, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2017.07.005>
- [11] Letos, C., Letos, D.: *The determination of the touristic potential for the settlements form Ozana-Topolita depression*, *GeoJournal of Tourism and Geosites*, vol. 10, pp. 172-182, 2012.
- [12] Mrđa, A., Carić, H., Bojanić Obad Šćotaroci, B.: *The Importance of the Concept of Tourism Carrying Capacity for Spatial Planning*, *Prostor* 22, pp. 212-227, 2014.
- [13] Torres-Delgado, A., López Palomeque, F.: *The ISOST index: a tool for studying sustainable tourism*, *Journal of Destination Marketing & Management* 8, pp. 281-289, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2017.05.005>

- [14] Dedeker, A.: Creating sustainable tourism ventures in protected areas: An actor-network theory analysis, *Tourism Management* 61, pp. 161-172, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.02.006>
- [15] Feifer, M.: *Going places*, London Macmillan, 1985.
- [16] Jansson, A.: Rethinking post-tourism in the age of social media, *Annals of Tourism Research* 69, pp. 101-110, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.annals.2018.01.005>
- [17] Juganaru, I., Juganaru, M., Anghel.: Sustainable tourism types, *Annals of University of Craiova- Economic Sciences Series*, vol. 2(36), pp. 797-804, 2008.
- [18] Petrić, L.: How to Develop Tourism Sustainably in the Coastal Protected Areas? The Case of "Biokovo Park of Nature", *Acta turistica nova*, 2 (1), pp. 5-24
- [19] Ozimec, R., Protrka, K.: Pasture on Mt. Biokovo, Scientific and professional meeting, Biokovo at the turn of the millennium - the development of Nature Park in the 21st century, Book of abstracts, pp. 58-60, 2011.
- [20] Ozimec, R.: Agro biodiversity of Mt. Biokovo, Scientific and professional meeting, Biokovo at the turn of the millennium - the development of Nature Park in the 21st century, Book of abstracts, pp. 55-57, 2011.
- [21] Javna ustanova Park prirode Biokovo, *Izveštće o provedbi Godišnjeg programa za godinu 2013, 2014, 2015, 2016, 2017.*
- [22] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja: *Prostorni plan Parka prirode Biokovo*, 2015.
- [23] Biggs, D.: Understanding Resilience in a Vulnerable Industry: The Case of Reef Tourism in Australia, *Ecology and Society* 16(1): 30. 2011, <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art30/>

## Računalni programi za provjeru provoznosti na cestovnim raskrižjima

Šime Bezina<sup>1</sup>, Ivana Cestar<sup>2</sup>, Ivica Stančerić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, [sbezina@grad.hr](mailto:sbezina@grad.hr)

(2) VIACON d.o.o., Zagreb, Republika Hrvatska, [ivana826@gmail.com](mailto:ivana826@gmail.com)

### Sažetak

Provjera provoznosti jedan je od najvažnijih koraka pri projektiranju cestovnih raskrižja. Svako raskrižje uz uvjete sigurnosti i propusne moći mora zadovoljiti i uvjete provoznosti za odabrano mjerodavno vozilo. Klasične metode provjere provoznosti šablonama gotovo da se više i ne primjenjuju. Zamijenili su ih specijalizirani računalni programi koji vjerno simuliraju kretanje vozila kroz raskrižje i omogućuju provjeru provoznosti na jednostavan, precizan i brz način. Spomenute karakteristike računalnih programa omogućavaju razvoj postojećih i istraživanje novih geometrijskih oblika cestovnih raskrižja. U ovome je radu provjerom provoznosti na četverokrakim i kružnim raskrižjima, oblikovanim prema domaćoj normi i smjernicama, detaljno opisan i ocijenjen način rada dva računalna programa, *Vehicle Tracking* i *AutoTURN*.

*Ključne riječi: cestovna raskrižja, provjera provoznosti, mjerodavna vozila, računalni programi, trajektorije kretanja vozila*

## Software for swept path analysis on road intersections

### Abstract

Swept path analysis is one of the most important steps in the design of road intersections. Every intersection, except safety and capacity conditions, must also meet the conditions of an undisturbed passage of the selected design vehicle. The classic methods of swept path analysis with templates are almost no longer applied. They have been replaced by the specialised software that simulates the movement of the vehicle realistically through an intersection and make swept path analysis quick, accurate and easy. These software features enable the development of existing and exploration of new geometric forms of road intersections. For this reason, in this paper, two software, *Vehicle Tracking* and *AutoTURN*, have been analysed and evaluated in detail. They were evaluated through the procedure of swept path analysis on four-leg classic and roundabout intersections, designed according to domestic standards and guidelines.

*Keywords: road intersections, swept path analysis, design vehicles, software, vehicle trajectories*

## 1. Uvod

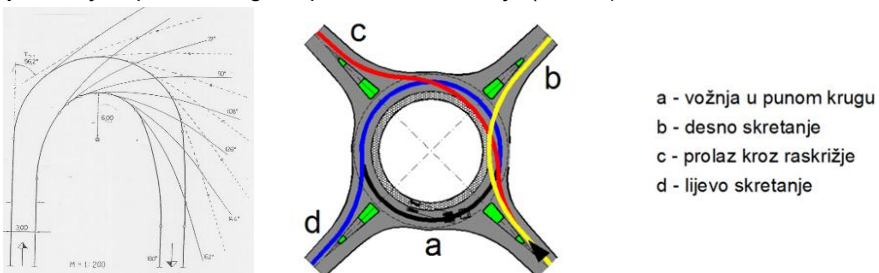
Svako kvalitetno projektirano cestovno raskrižje, pored sigurnosti i propusne moći, mora zadovoljiti i uvjete provoznosti. Potreba za ispitivanjem provoznosti proizlazi iz uobičajenog načina geometrijskog oblikovanja raskrižja, opisanog u hrvatskoj normi [1] i smjernicama [2-5], koje se uglavnom sastoji od sljedećih koraka: oblikovanje pojedinih elemenata raskrižja (rubovi kolnika, otoci, dodatni trakovi za lijevo i desno skretanje) i njihovo sastavljanje u građevinski projekt, provjera provoznosti projektiranog čvorišta za mjerodavno vozilo (šablonama ili računalnim programima), ispravljanje projektnih elemenata čvorišta, provjera provodne brzine (samo kružna raskrižja) i provjera preglednosti. Na raskrižjima se pri skretanju vozila kreću po putanji koja se sastoji od kružnih lukova malih polumjera te "prebrišu" veću površinu kolnika nego pri vožnji u pravcu. Zbog toga je potrebno osigurati dostatnu širinu kolnika. Iscrtavanje trajektorija kretanja vozila ima veoma važnu ulogu u postupku oblikovanja raskrižja kako bi se ostvarilo sigurno i nesmetano odvijanje prometa. Uz to je neophodno izabrati mjerodavno vozilo za koje će se osigurati provoznost s obzirom na rang ceste i/ili strukturu prometnog toka.

## 2. Provjera provoznosti na cestovnim raskrižjima prema pravilima

U nastavku rada opisani su načini provjere provoznosti raskrižja i mjerodavna vozila prema hrvatskoj normi [1] i smjernicama [2].

### 2.1. Hrvatske norma i smjernice

U Republici Hrvatskoj postoji norma [1] iz 1990. godine za projektiranje trokrakih i četverokrakih kanaliziranih raskrižja te smjernice [2] za projektiranje kružnih raskrižja iz 2014. godine. U normi [1] su opisani načini provjere provoznosti raskrižja pomoću šablona te su definirana dva mjerodavna vozila, teretni automobil i teretni automobil s prikolicom. Šablone (Slika 1) su napravljene samo za spomenuta vozila u mjerilu 1:200 te za različite unutrašnje polumjere kružnih lukova ( $R_u = 6-10$  m) [1]. Provjera provoznosti na kružnim raskrižjima prema smjernicama [2] vrši se grafičkim prikazom trajektorija kretanja krajnjih točaka karoserije mjerodavnog vozila na tlocrtnom prikazu raskrižja za lijevo i desno skretanje, vožnju u punom krugu te prolaz kroz raskrižje (Slika 1).



**Slika 1.** Šablona za provjeru provoznosti [1] i smjerovi kretanja mjerodavnog vozila pri provjeri provoznosti kružnog raskrižja [2]

Minimalna zaštitna širina uz trajektorije iznosi 0.5 m na svim segmentima osim na vanjskoj strani kružnog kolnika gdje iznosi minimalno 1.0 m. Za provjeru provoznosti kružnih raskrižja koriste se teretni automobil s poluprikolicom i teretni automobil s prikolicom [2].

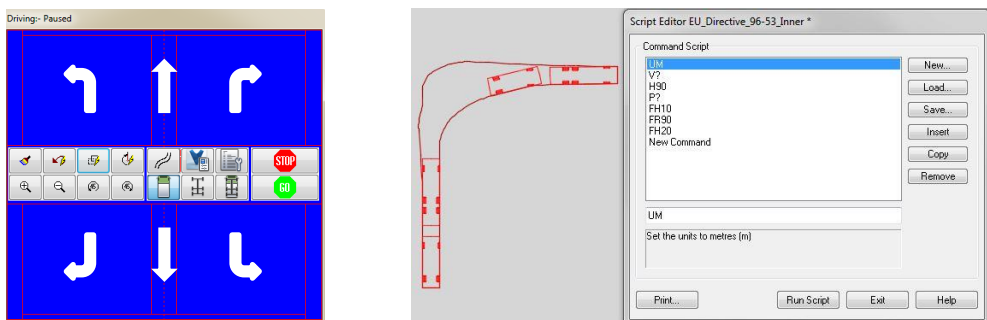
### 3. Računalni programi za provjeru provoznosti na raskrižjima

Na tržištu su dostupni brojni računalni programi pomoću kojih se može izvršiti provjera provoznosti raskrižja, a dva najzastupljenija programa su *Vehicle Tracking* (Autodesk) [6] i *AutoTURN* (Transoft Solutions) [7]. Navedeni se programi koriste kao dodatne aplikacije u CAD sučelju. Unatoč njihovoj širokoj primjeni i brojnim opcijama koje nude, u nastavku će se samo opisati na koje se sve načine pomoću njih može provjeriti provoznost raskrižja.

#### 3.1. Vehicle Tracking

*Vehicle Tracking* [6] se koristi za simulaciju i analizu kretanja motornih vozila, lakih tračničkih vozila i zrakoplova te za oblikovanje parkirališnih površina i kružnih raskrižja. Simulacija kretanja vozila temelji se na idealnim uvjetima vožnje, a dinamički utjecaji, nagib i vlažnost kolnika se zanemaruju. Program omogućava kreiranje vlastitog vozila ili odabir između brojnih unaprijed definiranih mjerodavnih vozila različitih dimenzija i oblika iz različitih država. Program iscrtaava trajektorije kretanja za sve kotače i krajnje točke karoserije vozila pomoću četiri različite naredbe: *AutoDrive* (Arc/Bearing), *Manual Drive*, *Follow* i *Script*.

Naredbom *AutoDrive* trajektorije kretanja se automatski iscrtavaju za vozilom koje se po željenoj putanji navodi pomoću miša. Osnovni parametri kretanja vozila (najmanji polumjer kruga koji opisuje krajnja unutarnja ili vanjska točka vozila, kut zakretanja prednjih kotača) su unaprijed zadani, a dodatno se mogu definirati zaštitne bočne širine. Glavna razlika između naredbi *Arc* i *Bearing* je u tome što se kod *Bearing* naredbe dodatno može zadati fiksni skretni kut (od 30 do 180°) pod kojim će vozilo skretati lijevo ili desno. Naredba *Manual Drive* služi za ručno upravljanje vozilom pomoću grafičkog korisničkog sučelja koje omogućuje virtualnu vožnju u svim smjerovima (Slika 2). Naredba *Follow* služi za iscrtavanje trajektorija kretanja vozila kada vozilo s određenom točkom na karoseriji prati zadanu liniju vođenja. Naredba *Script* služi za iscrtavanje trajektorija kretanja vozila pomoću tekstualnih zapisa u okviru grafičkog korisničkog sučelja (Slika 2). Pomoću te naredbe se mogu generirati predlošci s najčešće korištenim manevrima vozila (Slika 2).

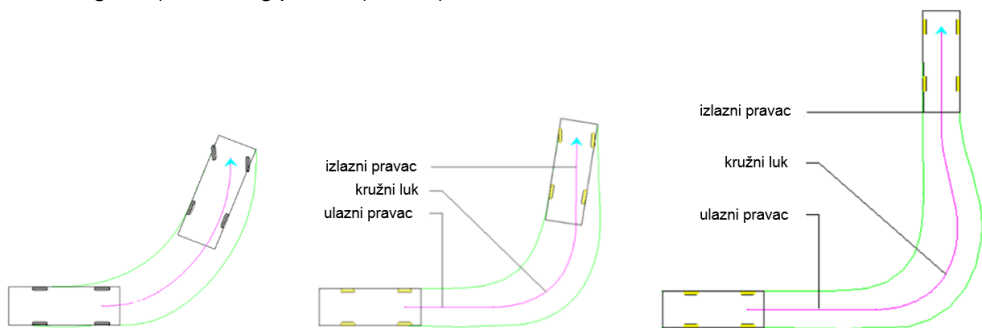


Slika 2. Manual Drive (lijevo) i Script (desno) grafička korisnička sučelja

### 3.2. AutoTURN

Računalni program *AutoTURN* [7] primjenjuje se za analizu provoznosti cesta, raskrižja, autobusnih kolodvora, prilaza za utovar/istovar i parkirališta. Kretanje vozila prikazuje se u obliku trajektorija i animacija. *AutoTURN* omogućuje odabir mjerodavnih vozila iz niza različitih država te definiranje vlastitog vozila. Iscrtavanje trajektorija kretanja najistaknutijih točaka vozila i površine koju te trajektorije omeđuju pomoću *AutoTURN*-a, moguće je provesti na nekoliko različitih načina aktiviranjem sljedećih naredbi: *Generate Arc Path*, *Generate/Oversteer Corner Path*, *Steer A Path* i *Place Adaptive Simulation*.

Pomoću naredbi *Generate Arc Path* i *Generate/Oversteer Corner Path* prvo se definira početni i krajnji položaj vozila te smjer kretanja (naprijed ili nazad), zatim se između dva različita položaja vozila automatski generiraju trajektorije kretanja predstavljajući najkraći put. Razlika između spomenutih naredbi je u tome kako će program generirati najkraći put, tj. od kojih će se geometrijskih elemenata sastojati. Naredbom *Generate Arc Path* iscrtavaju se trajektorije sastavljene od kružnih lukova, a naredbom *Generate/Oversteer Corner Path* iscrtavaju se trajektorije sastavljene od ulaznog pravca, kružnog luka (određenog polumjera i skretnog kuta) i izlaznog pravca (Slika 3).



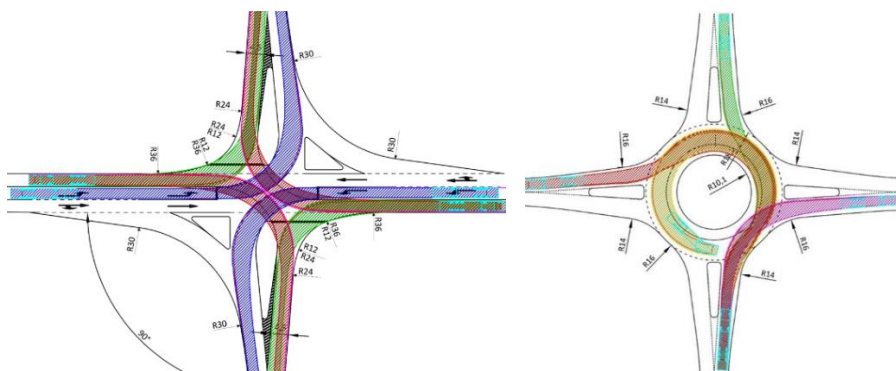
**Slika 3.** Primjer trajektorija kretanja vozila za *Generate Arc Path* (lijevo), *Generate Corner Path* (u sredini) i *Oversteer Corner Path* (desno)

Razlika između naredbi *Oversteer* i *Generate* je u tome što *Oversteer* dopušta preupravljanje prednjih kotača te se zbog toga primjenjuje kada je potrebno zaobići neku fiksnu prepreku s unutarnje strane kružnog luka. *Steer A Path* predstavlja ručno upravljanje vozilom pomicanjem miša u željenom smjeru kretanja vozila. Naredba *Adaptive Simulation* se koristi kada vozilo prati prethodno zadanu liniju vođenja. Osnovni parametri kretanja vozila (najmanji polumjer kruga koji opisuje krajnja unutarnja ili vanjska točka vozila, kut zakretanja prednjih kotača) su unaprijed zadani.

### 3.3. Analiza računalnih programa na primjerima cestovnih raskrižja

Analiza spomenutih računalnih programa provedena je na shemama četverokrakih i kružnih raskrižja oblikovanih prema normi [1] i smjericama [2] u *AutoCAD* programu (slika 4) [8]. Na temelju analize naredbe za iscrtavanje trajektorija okarakterizirane su kao jednostavne (nisu potrebne pripremne radnje, trajektorije se između zadanih točaka iscrtavaju automatski, moguće je naknadno korigirati trajektorije) ili složene (potrebne prethodne

radnje kao npr. definiranje linije vođenja, poznavanje i pisanje tekstualnih naredbi, nije moguće naknadno korigirati trajektorije, vozilom se upravlja pomoću grafičkog sučelja) (Tablica 1). Pomoću naredbi *AutoDrive Arc/Bearing Generate Arc Path* i *Steer A Path* trajektorije se iscrtavaju na jednostavan način zato što prijelazi između istosmjernih i protusmjernih krivina ne uključuju međupravce za razliku od naredbi *Generate/Oversteer Corner Path*. Naredbe *Auto Drive* i *Generate Arc Path* omogućavaju naknadno pomicanje pojedinih točaka trajektorija što uvelike olakšava provjeru provoznosti raskrižja. Ako se točka trajektorije pomakne u poziciju koja ne odgovara voznim karakteristikama vozila, programi automatski javljaju grešku.



**Slika 4.** Provjera provoznosti raskrižja računalnim putem – trajektorije kretanja vozila

Naredbe *Follow* i *Adaptive Simulation* nemaju opciju naknadnog uređivanja trajektorija, već zahtijevaju promjenu geometrijskih elemenata linije vođenja pa taj problem posebno dolazi do izražaja na kružnim raskrižjima zbog „S“ vožnje. Naredba *Oversteer Corner Path* zbog preupravljanja prednjih kotača te ulaznih i izlaznih pravaca, nije prikladna za ispitivanje provoznosti na kružnim raskrižjima, a na četverokrakim predstavlja problem kod mimoilaženja vozila. Naredbe *Manual Drive* i *Script* zahtijevaju od korisnika dodatnu količinu znanja i iskustva. Upravljanje vozilom kod *Manual Drive*-a ovisi o spretnosti korisnika zbog čega trajektorije u pojedinim slučajevima mogu izgledati neprecizno. Promatrajući naredbe sa stajališta prilagodljivosti različitim tipovima raskrižja, može se zaključiti da su naredbe unutar *Vehicle Tracking*-a potpuno prilagođene upotrebi na svim tipovima raskrižja, za razliku od naredbi u okviru *AutoTURN*-a gdje se javljaju poteškoće prilikom provjere provoznosti na kružnim raskrižjima ako se koriste naredbe *Generate/Oversteer Corner Path*.

**Tablica 1.** Složenost korištenja pojedine naredbe prema tipu raskrižja

Vehicle Tracking	AutoDrive Arc	AutoDrive Bearing	Script	Manual Drive	Follow
Četverokrako	jednostavno	jednostavno	složeno	složeno	složeno
Kružno	jednostavno	jednostavno	složeno	složeno	složeno
AutoTURN	Generate Arc Path	Generate Corner Path	Oversteer Corner Path	Steer A Path	Adaptive Simulation
Četverokrako	jednostavno	jednostavno	složeno	jednostavno	složeno
Kružno	jednostavno	složeno	-	jednostavno	složeno

Važno je napomenuti da proizvođači računalnih programa ne preuzimaju odgovornost za pogreške i štete koje mogu proizaći na temelju korištenja njihovih programa. Zbog toga je provedena analiza točnosti za *Vehicle Tracking*, a rezultati [9] su pokazali da su odstupanja veća od stvarno izmjerenih vrijednosti na poligonu za najviše 14 cm. Prema [10] prosječno odstupanje između vrijednosti određenih mjerenjem na terenu i vrijednosti određenih simulacijom kretanja vozila u računalnom programu, *Vehicle Tracking* iznosi -7 cm. Simulacija je u 95% slučajeva rezultirala većim širinama površina koje su vozila prebrisala od stvarnih, što je s aspekta projektiranja na strani sigurnosti. Rezultati T-testa [10] su pokazali da se sa 95% pouzdanošću može tvrditi da između promatranih varijabli nema razlike. Međusobnom usporedbom oba računalna programa (naredbe *Follow* i *Adaptive Simulation*), analizirane su širine putanja koje vozilo (tegljač s poluprikolicom) opisuje pri vožnji po krivinama različitih polumjera (od 12.5 do 25 m) i skretnih kutova (od 60 do 120°). Ustanovljeno je da u *AutoTURN*-u vozilo opisuje nešto veću širinu, od 1 do 4 cm [8].

#### 4. Zaključak

Primjena računalnih programa za provjeru provoznosti je neophodna u svakodnevnoj istraživačkoj i projektantskoj praksi. U hrvatskim i stranim smjernicama [1-5] nije detaljno objašnjeno na koji se način računalni programi trebaju primjenjivati pri provjeri provoznosti. To u konačnici može rezultirati različitim projektnim rješenjima cestovnih raskrižja jer analizirani računalni programi nude brojne naredbe za crtanje trajektorija kretanja vozila. Stoga je za dobru provjeru provoznosti važno na već izgrađenim raskrižjima promotriti i analizirati stvarno kretanje vozila.

#### Literatura

- [1] HRN U.C4.050, Projektiranje i građenje cesta, površinski čvorovi, tehnički uvjeti, 1990.
- [2] Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, srpanj 2014.
- [3] Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), Ausgabe 2012. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV Verlag), Köln 2012.
- [4] Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren, K 10000, FGSV, Köln, 2006.
- [5] Plangleiche Knoten - Kreisverkehr, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, (RVS 03.05.14), Wien, 2001.
- [6] Autodesk Vehicle Tracking. Autodesk, San Rafael, CA, 2015.
- [7] AutoTURN, Transoft Solutions Inc. Richmond, BC, Canada, 2015.
- [8] Cestar, I.: Provoznost cestovnih raskrižja – diplomski rad, Zagreb: Građevinski fakultet, 2. srpnja 2015.
- [9] Korlaet, Ž., Dragčević, V., Stančerić, I.: Designing Criteria of Acute Angle Four-Leg Intersection At-Grade. Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Ed by Harwood, D.W.; Garcia Garcia, A. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de Valencia, 2010.
- [10] Džambas, T.: Oblikovanje standardnih turbokružnih raskrižja na temelju zakonitosti kretanja mjerodavnog vozila – disertacija, Zagreb: Građevinski fakultet, 11. srpnja.2018.



## Primjena praha otpadnih guma kao zamjenskog materijala (punila) u samozbijajućem betonu (SCC)

Robert Bušić<sup>1</sup>, Ivana Miličević<sup>1</sup>

(1) Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska,  
{rbusic; imilicevic}@gfos.hr

### Sažetak

S obzirom na ubrzan rast stanovništva u svijetu, broj otpadnih automobilskih guma je postao ozbiljan ekološki problem. Razgradnja otpadnih guma traje duže od pola stoljeća, a njihov broj je iz godine u godinu sve veći. Otpadne automobilske gume predstavljaju resurs za ponovni ulazak na tržište kao posve novi materijal. Posebno zanimljivo područje primjene reciklirane otpadne gume je unazad nekoliko desetljeća područje građevinskih materijala gdje se reciklirana otpadna automobilska guma koristi u sve većoj mjeri. Trenutno se samo 5% otpadne reciklirane automobilske gume koristi u građevinarstvu za potrebe gradnje novih ili rekonstrukcije postojećih građevina. U ovom je radu prikazana moguća primjena reciklirane otpadne automobilske gume u relativno novom proizvodu, samozbijajućem betonu (SCC) te mogući potencijal primjene praha otpadnih guma kao punila u samozbijajućem betonu (SCC).

*Ključne riječi: samozbijajući beton, prah otpadne gume, leteći pepeo*

## Application of waste tire powders as substitute materials (fillers) in self-compacting concrete (SCC)

### Abstract

Due to the exponential increase in the world population, many discarded waste vehicle tires has become a serious ecological problem. Decomposition of the waste tire rubber can take longer than half of the century, and their number is increasing each year. Waste tire rubber represents the potential for re-entering the market through the new materials. Over the past two decades, the area of construction and building materials has become particularly interesting area of application of recycled waste tires. Currently, only 5% of recycled waste tire rubber were used in civil engineering for the construction of a new or reconstruction of existing buildings. This paper presents a possible application of recycled waste tire rubber in the relatively new product, self-compacting concrete (SCC) and potential use of waste tire powder as a filler in self-compacting concrete (SCC).

*Keywords: self-compacting concrete, waste tire powder, fly ash*

## **1. Uvod**

Broj neupotrebljivih otpadnih guma različitih tipova vozila ubrzano raste i može se reći da ovaj podatak predstavlja jedan od glavnih ekoloških problema 21. stoljeća. Približno 1000 milijuna otpadnih guma se proizvede svake godine [1]. Zbog sve većeg broja otpadnih guma diljem svijeta, odlagališta su pretrpana otpadnim gumama i priroda je izložena potencijalnim okolišnim prijetnjama kao što su komarci, miševi, štetočine, širenje zaraznih bolesti i povećana opasnost od požara [2], [3]. Zbog činjenice da je bionerazgradivi materijal te da ima relativno dug vijek trajanja, interes za korištenje otpadne gume kao zamjenskog materijala za prirodni sitni i krupni agregat je počeo plijeniti pozornost inženjerima i građevinskoj industriji ponajviše zbog mogućnosti plasiranja novog, ekološki prihvatljivog proizvoda na tržište, tzv. gumiranog betona (eng. *rubberized concrete*). U Republici Hrvatskoj je gospodarenje otpadnom gumom uređeno zakonskom regulativom. Zakonom o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/2013, 73/2017) [4] određena je obaveza odvojenog sakupljanja otpada, pa tako i otpadne gume kao jedne od posebnih kategorija otpada, dok su Pravilnikom o gospodarenju otpadnim gumama (NN 113/16) [5], koji proizlazi iz ranije navedenog Zakona, propisani postupci i ciljevi gospodarenja otpadnim gumama, vrsta otpadnih guma koje se sakupljaju te zahtjevi u pogledu sakupljanja i recikliranja otpadnih guma. Što se tiče upotrebe reciklirane automobilske gume kao zamjenskog materijala u betonu, pregledom literature je utvrđeno da je većina istraživača koristila granule guma kao zamjenu za prirodni sitni i krupni agregat, šljunak i/ili pijesak, prilikom izrade betonskih mješavina. Granule guma su se koristile u određenom postotku s obzirom na volumen ili ukupnu masu sitnog ili krupnog agregata. Manji broj istraživanja proveden je vezano za upotrebu praha otpadnih guma (eng. *waste tire powder*), veličine zrna 0.00 do 0.50 mm, kao zamjenskog materijala, tj. dodatak ili punilo (eng. *filler*) u samozbijajućem betonu. U nastavku rada je prikazan kratak pregled dosadašnjih istraživanja svojstava relativno nove vrste betona, samozbijajućeg betona (eng. *self-compacting concrete*), s gumom kao zamjenskim materijalom za prirodni sitni i krupni agregat, te preliminarni rezultati eksperimentalnih ispitivanja provedenih u svrhu boljeg razumijevanja ponašanja samozbijajućeg betona s prahom otpadnih automobilskih guma (eng. *waste tire rubber*). Dodatno je izrađena mješavina s letećim pepelom (eng. *fly ash*) kao punilom te je provjeren i istražen utjecaj letećeg pepela na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i u očvrslom stanju.

## **2. Svojstva samozbijajućeg betona sa recikliranom gumom**

### **2.1. Svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju**

U dosadašnjim eksperimentalnim istraživanjima, većina je autora navela slično ponašanje samozbijajućeg betona u svježem stanju nakon dodavanja gume kao zamjenskog materijala, tj. smanjenje sposobnosti tečenja, sposobnosti zaobilazanja zapreka i otpornosti segregaciji te povećanje viskoznosti s povećanjem sadržaja gume. U Tablici 1 je vidljivo kako je većina autora obavljala eksperimentalna ispitivanja u kojima je sitni ili krupni prirodni agregat zamijenila gumom čak do 60%, i to radi očuvanja prihvatljivih svojstva

samozbijajućeg betona u svježem stanju. Od ostalih svojstava SCC-a u svježem stanju korisno je spomenuti da se sadržaj zraka i poroznost betona povećavaju s povećanjem udjela reciklirane gume u sastavu samozbijajućeg betona [6]–[9]. Čestice gume imaju grubu površinu i oštre rubove [10], te tako povećavaju poroznost SCC-a.

**Tablica 1.** Samozbijajući beton s recikliranom gumom kao zamjenskim materijalom za prirodni agregat

Referenca	Zrno (mm)	Postotak zamjene (%)	Zamijenjeni materijal
Uygunoğlu i Topçu [6]	1.00 – 4.00	10, 20, 30, 40 i 50	sitni agregat
Ganesan i sur. [11]	0 - 4.75	15 i 20	sitni agregat
Emiroğlu i sur. [2]	5 - 12	15, 30, 45 i 60	krupni agregat
Ismail i Hassan [12]	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 i 50	sitni agregat
Güneyisi [13]	0 - 4	5, 15 i 25	sitni agregat

## 2.2. Svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

Budući da mehanička svojstva betona određuju područje primjene betona, većina je autora u sklopu znanstvenih istraživanja ispitivala tlačnu čvrstoću i sekantni modul elastičnosti, dok je manji broj autora ispitivao dinamička i trajnosna svojstva samozbijajućeg betona. U Tablici 2 je prikazan utjecaj veličine zrna, postotka zamjene i zamijenjenog materijala na promatrana mehanička svojstva samozbijajućeg betona.

**Tablica 2.** Utjecaj veličine zrna, postotka zamjene i zamijenjenog materijala na mehanička svojstva samozbijajućeg betona

Referenca	Zrno (mm)	Postotak zamjene (%)	Zamijenjeni materijal	Smanjenje $f_{ck}$ (%)	Smanjenje E (%)
Ismail i Hassan [12]	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30 i 40	sitni agregat	16, 21, 29, 42, 46, 53 i 67	6, 8, 18, 31, 32, 40 i 54
AbdelAleem i sur. [14]	<4.75	0, 5, 10, 15, 20, 25 i 30	sitni agregat	12, 29, 41, 49, 51 i 58	6, 13, 16, 25, 32 i 36
Ismail i sur. [15]	<4.75	5, 10, 15, 20, 30 i 40	sitni agregat	12, 19, 28, 39, 50 i 61	4, 8, 19, 28, 34 i 46
Ismail i Hassan [7]	<4.75	5, 10, 15, 20, 25 i 30	sitni agregat	12, 29, 41, 49, 51 i 58	6, 12, 16, 25, 32 i 36

Efekt smanjenja vrijednosti mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona s povećanjem postotka zamjene prirodnog sitnog i krupnog agregata recikliranom gumom, može se objasniti lošom adhezijom i slabom čvrstoćom veze između čestica gume i cementne paste, niskim modulom elastičnosti gume u usporedbi s modulom elastičnosti prirodnog riječnog agregata i povećanim udjelom pora i zraka zarobljenog između čestica gume i cementne paste [9], [16]. U literaturi se također pojavljuju betonske mješavine u kojima su korišteni različiti materijali kao zamjena cementu (eng. supplementary cementing materials) poput letećeg pepela (eng. fly ash), silicijske prašine (eng. silica fume), metakaolina (eng. metakaolin) te zgure (eng. slag), sve u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona s gumom [12], [15]. Stoga će se, pored utjecaja praha otpadnih

automobilskih guma, u nastavku rada prikazati i utjecaj letećeg pepela (FA) na mehanička svojstva samozbijajućeg betona.

### 3. Preliminarna laboratorijska ispitivanja

U ovom su radu prikazana ispitivanja svježeg i očvrslog samozbijajućeg betona temeljena na djelomičnoj zamjeni punila (filera) prahom otpadnih automobilskih guma i letećim pepelom. Kako bi se mogli definirati konačni sastavi mješavina samozbijajućih betona, provedena su preliminarna laboratorijska ispitivanja na probnim mješavinama u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Osijeku. Projektirane su tri probne betonske mješavine, a sastav betonskih mješavina je u Tablici 3. Betonske mješavine su projektirane u skladu s Europskim smjernicama za samozbijajući beton [17].

**Tablica 3.** Sastavi betonskih mješavina

Materijal	Gustoća (kg/dm <sup>3</sup> )	SCC-0 (kg)	SCC-25-FA (kg)	SCC-25-TP (kg)	
Cement 32.5 N	2.72	450.00	450.00	450.00	
Voda Gradski vodovod	1.00	202.50	202.50	202.50	
v / c Vodocementni omjer	-	0.45	0.45	0.45	
Dodatak 1 Glenium ACE 430	1.06	4.50	4.50	4.50	
Dodatak 2 RheoMatrix	1,00	0.90	0.90	0.90	
Punilo (filer)	Dolomitno brašno	2.86	150.00	112.50	112.50
	Leteći pepeo (FA)	1.98	0.00	37.50	-
	Prah reciklirane gume (TP)	1.23	0.00	0.00	37.50
Agregat	Pijesak riječni 0-2 mm	2.60	290.92	289.15	286.27
	frakcija 0-4 mm - dolomit	2.82	552.19	548.83	543.36
	frakcija 4-8 mm - dolomit	2.75	307.71	305.83	302.79
	frakcija 8-16 mm- dolomit	2.81	393.02	390.63	386.74

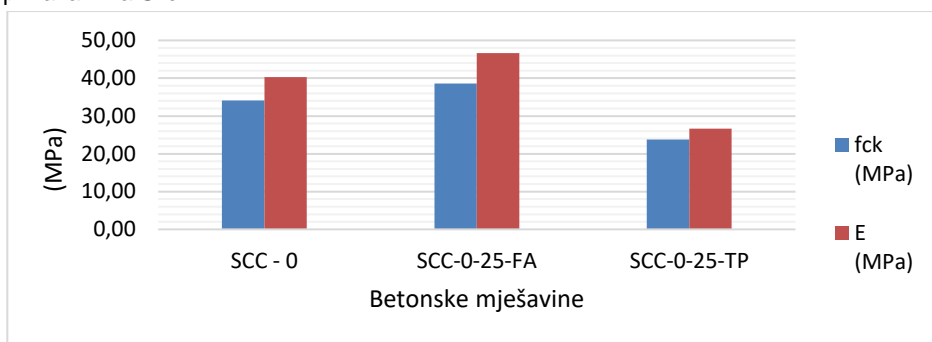
U ispitivanju se koristio leteći pepeo (FA) iz termoelektrane Tuzla te reciklirana guma (TP) tvrtke Gumiimpex-GRP d.o.o. Varaždin. Finoća punila je ispitana metodom propusnosti zraka na Blaineovom aparatu. Finoća dolomitnog brašna je iznosila 5406.70 cm<sup>2</sup>/g, letećeg pepela 3698.26 cm<sup>2</sup>/g, a praha reciklirane gume 1685.91 cm<sup>2</sup>/g. Ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju su provedena u skladu s važećim normama HRN EN 12350-8:2010 [18], HRN EN 12350-10:2010 [19], HRN EN 12350-12:2010 [20] te u skladu s Europskim smjernicama za samozbijajući beton [17]. U Tablici 4 su rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju i u očvrsлом stanju.

**Tablica 4.** Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem i očvrsлом stanju

Oznaka mješavine	p (%)	PJ (mm)	T500 (s)	H2/H1	f <sub>ck</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E (MPa)
SCC-0	2.10	25.8	1.8	0.56	34.10	40.33
SCC-25-FA	0.71	22.0	2.0	0.75	38.63	46.64
SCC-25-TP	2.50	34.5	2.3	0.42	23.77	26.69

Uspoređujući s referentom mješavinom (SCC-0), utvrđeno je da je zamjena 25% dolomitnog brašna letećim pepelom (SCC-25-FA) uzrokovala pad poroznosti svježeg samozbijajućeg betona za 66%, te povećanje sposobnosti zaobilaženja zapreka za 15% (j-prsten) i 43% (L-kutija) te povećanje viskoznosti za 11%. Rezultati dobiveni zamjenom 25% dolomitnog brašna prahom otpadnih automobilskih guma (SCC-25-TP) pokazuju povećanje poroznosti za 19%, smanjenje sposobnosti zaobilaženja zapreka za 34% (j-prsten) i 26% (L-kutija) te povećanje viskoznosti za 28%, u usporedbi s referentom mješavinom (SCC-0). Iz navedenog se zaključuje da se upotrebom otpadnog praha automobilskih guma (TP) i letećeg pepela (FA) mogu dobiti zadovoljavajuća svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju pri čemu je značajna razlika vidljiva jedino u svojstvu poroznosti uslijed upotrebe letećeg pepela (FA) što ima za posljedicu beton boljih svojstava u očvrslom stanju.

Tlačna čvrstoća je ispitana na uzorcima kocke dimenzija 150×150×150 mm u skladu s normom HRN EN 12390-3:2009 [21], a statički modul elastičnosti je ispitana na uzorcima valjka dimenzija 150×300 mm u skladu s normom HRN EN 12390-13:2013 [22]. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti samozbijajućeg betona su grafički prikazani na Slici 1.



**Slika 1.** Srednja vrijednost tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona

Sve su betonske mješavine imale vrijednost tlačne čvrstoće veću od 23 N/mm<sup>2</sup>, te vrijednost statičkog modula elastičnosti veću od 25 MPa. Povećanje tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti u iznosu od 13.28% i 15.66% je ostvareno zamjenom 25% mase punila (dolomitnog brašna) letećim pepelom (mješavina SCC-0-25-FA), dok smanjenje istih mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona iznosi 30.28% i 33.82% ako 25% mase punila (dolomitnog brašna) zamijenimo prahom otpadnih automobilskih guma (mješavina SCC-0-25-TP). Iz navedenog proizlazi zaključak da svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju mogu biti zadovoljavajuća ako se otpadni prah automobilskih guma ili leteći pepeo iskoristi kao punilo te se može predložiti istovremena zamjena punila letećim pepelom i otpadnim prahom automobilskih guma.

#### 4. Zaključak

Korištenjem reciklirane otpadne automobilske gume u samozbijajućem betonu (SCC) potencijalno se smanjuje negativan učinak i rast broja odlagališta otpadnih guma kao i njihov

negativan ekološki učinak. Dosadašnja eksperimentalna istraživanja su temeljena na zamjeni prirodnog krupnog ili sitnog agregata granulama reciklirane otpadne automobilske gume, s tim da je većina laboratorijskih ispitivanja provedena na zamjeni sitnog agregata tj. pijeska, granulama gume. Za razliku od dosadašnjih eksperimentalnih ispitivanja, u ovom je radu prikazan drugačiji pristup. Punilo (filer) se u određenom postotku zamijenilo prahom otpadnih automobilskih guma. Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju pokazuju povećanu viskoznost te smanjenu sposobnost tečenja i zaobilaženja zapreka nakon zamjene filera prahom otpadne gume. Uočen je i pad vrijednosti tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti s tim da je smanjenje navedenih vrijednosti u granicama koje i dalje pokazuju potencijal korištenja samozbijajućeg betona s otpadnim prahom automobilskih guma. S druge strane pozitivan efekt zamjene punila letećim pepelom se mogao uočiti kod svježeg i očvrstlog betona. S obzirom na dobivene rezultate ispitivanja, zaključuje se da bi se samozbijajući beton s gumom potencijalno mogao koristiti za konstruktivne svrhe, ali se postotak zamjene punila mora racionalno odrediti u svrhu očuvanja prihvatljivih vrijednosti mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona. Nadalje predlaže se provedba eksperimentalnih istraživanja samozbijajućeg betona u kojemu će se punilo istovremeno zamijeniti prahom otpadnih guma i letećim pepelom kako bi se pokušao umanjiti ili čak neutralizirati negativan učinak praha otpadnih guma na mehanička svojstva samozbijajućeg betona. Uz mehaničke karakteristike samozbijajućeg betona poput tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće savijanjem i modula elastičnosti predlaže se i dodatno eksperimentalno ispitivanje očvrstlog samozbijajućeg betona s otpadnim prahom automobilskih guma koje će obuhvaćati i ispitivanje skupljanja betona, veze betona s armaturom te bitnih trajnosnih svojstava samozbijajućeg betona kao što su otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, vodopropusnost, plinopropusnost te otpornost na karbonizaciju i difuziju klorida.

## Zahvala

Autori zahvaljuju na potpori istraživanju koje je financirala Hrvatska zaklada za znanost kroz uspostavni istraživački projekt: **Razvoj armiranobetonskih elemenata i sustava s otpadnim prahom automobilskih guma**, UIP-05-2017-7113.

## Literatura

- [1] Rahman, M. M., Usman, M., Al-Ghalib, A. A.: Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC),” *Construction and Building Material*, vol. 36, pp. 630–637, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.116
- [2] Emiroğlu, M., Yıldız, S., Keleştemur, O., Keleştemur, M. H.: Bond performance of rubber particles in the self-compacting concrete, *Bond in Concrete 2012 - Bond in New Materials under Severe Conditions*, pp. 779–786, 2012
- [3] Miller, N. M., Tehrani, F. M.: Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 147, pp. 264–271, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.155
- [4] Zakon o održivom gospodarenju otpadnom (NN 94/2013, 73/2017)
- [5] Pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama (NN 113/16)

- [6] Uygunođi, T., Topçu, I. B.: The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars, *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 7, pp. 1141–1150, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027
- [7] Ismail, M. K., Hassan, A. A. A.: Impact Resistance and Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete Reinforced with Steel Fibers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001731
- [8] Najim, K. B., Hall, M. R.: Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC), *Materials and Structures*, vol. 46, no. 12, pp. 2029–2043, 2013, doi: 10.1617/s11527-013-0034-4
- [9] AbdelAleem, B. H., Hassan, A. A. A.: Development of self-consolidating rubberized concrete incorporating silica fume, *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 389–397, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.146
- [10] Si, R., Wang, J., Guo, S., Dai, Q., Han, S.: Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber, *Journal of Cleaner Production*, vol. 180, pp. 823–831, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.180
- [11] Ganesan, N., Bharati Raj, J., Shashikala, A. P.: Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 7–14, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.077
- [12] Ismail, M. K., Hassan, A. A. A.: Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber, *Journal of Cleaner Production*, vol. 125, pp. 282–295, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.044
- [13] Güneysisi, E.: Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash, *Materials and Structures*, vol. 43, no. 8, pp. 1037–1048, 2010, doi: 10.1617/s11527-009-9564-1
- [14] AbdelAleem, B. H., Ismail, M. K., Hassan, A. A. A.: The combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 816–829, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.077
- [15] Ismail, M. K., De Grazia, M. T., Hassan, A. A. A.: Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete with Different Supplementary Cementing Materials, *International Conference of Transportation and Civil Engineering*, pp. 68–74, 2015, doi: 10.17758/UR.U0315331
- [16] Aslani, F., Ma, G., Yim Wan, D. L., Tran Le, V. X.: Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 1835–1847, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.003
- [17] EFNARC, “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete,” 2005.
- [18] HRN EN 12350-8:2010: Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump flow test.
- [19] HRN EN 12350-10:2010: Testing fresh concrete - Part 10: Self-compacting concrete - L box test
- [20] HRN EN 12350-12:2010: Testing fresh concrete - Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test
- [21] HRN EN 12390-3:2009: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens

- [22] HRN EN 12390-13:2013: Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression



## The impact of engineering-induced transient flow on transport in natural aquifers

Mariaines Di Dato<sup>1</sup>, Felipe P. J. de Barros<sup>2</sup>, Aldo Fiori<sup>3</sup> and Alberto Bellin<sup>4</sup>

- (1) *University of Split, Center of Excellence for Science and Technology - Integration of Mediterranean Region (STIM), Croatia, mddato@gradst.hr*  
(2) *Sonny Astani Department of Civil and Environmental Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA, fbarros@usc.edu*  
(3) *Dipartimento di Ingegneria, Roma Tre University, Rome, Italy, aldo.fiori@uniroma3.it*  
(4) *Department of Civil, Environmental and Mechanical Engineering, University of Trento, Trento, Italy, alberto.bellin@unitn.it*

### Abstract

In situ remediation is an effective technique to reduce risk caused by contaminated aquifers. However, low groundwater-flow velocity – typical in natural aquifers – hinders dilution, thereby reducing remediation efficiency. A possible strategy to overcome this problem consists of forcing the flow field by means of a geo-engineered system of alternate pumping. This work is aimed at investigating the coupled effect of geo-engineered unsteady flow and natural aquifer heterogeneity on remediation. Here we introduce an innovative analytical formulation to quantify dilution in 3D heterogeneous porous media under the effect of alternate pumping. Our solution relies on a simplified first-order framework, which limits the solution to point-like sources, weakly heterogeneous media, and slowly oscillating transient flows. Our results indicate that the efficiency of the unsteady flow field is mostly ruled by local-scale dispersion. Furthermore, we analyze several schemes of alternate pumping, thereby showing that inducing a forced rotation in the mean trajectory enhances remediation efficiency.

*Keywords: aquifer remediation, unsteady flow, first order approximation, dilution*

## Utjecaj induciranog tranzijentnog toka na transport u prirodnim vodonosnicima

### Sažetak

Sanacija podzemnih voda je uspješna metoda smanjivanja rizika uzrokovanog zagađenim vodonosnicima. Prirodni vodonosnici su obilježeni malim brzinama podzemne vode što otežava razrjeđivanje, a time i efikasnost procesa sanacije. Navedeni problem se potencijalno može riješiti prisilnim protjecanjem ako se uvede sustav izmjeničnog utiskivanja. U ovom radu će se istražiti povezani utjecaj takvog projektiranog nestacionarnog tečenja i prirodne heterogenosti vodonosnika na proces sanacije.

Uveden je inovativni analitički pristup za procjenu razrjeđenja u 3D heterogenom poroznom mediju pod utjecajem izmjeničnog utiskavanja. Predloženo rješenje spada u klasu prvog reda, što ga ograničava na točkaste izvore, blago heterogeni medij i tranzijentne tokove sa sporim promjenama. Ostvareni rezultati su ukazali da je efikasnost polja nestacionarnog tečenja dominantno pod utjecaj disperzije na lokalnoj skali. Nadalje, analizirano je nekoliko različitih shema izmjeničnog utiskavanja, što je ukazalo da induciranje prisilne rotacije u srednjoj trajektoriji toka povećava efikasnost procesa sanacije.

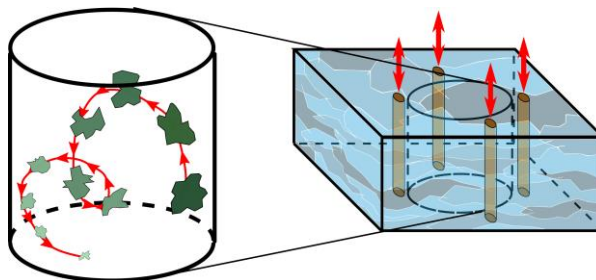
*Ključne riječi: sanacija vodonosnika, nestacionarni tok, aproksimacija prvog reda, razrjeđenje*

## 1. Introduction

One of the most important tasks of environmental sciences consists of developing efficient and cost-effective techniques for remediating soil and groundwater contamination. In general, groundwater contamination addresses two different objectives: preventing the contaminant migration from the source and, on the other hand, treating the polluted aquifer by removing or, at least, reducing the concentration of contaminants [1].

Remediation efficiency is mainly achieved by mixing, which induces velocity fluctuations that steep concentration gradient, thereby enhancing the dilution process conducted by local dispersion, e.g. [2][3][4][5][6]. An effective strategy to improve mixing can be through pumping systems, in order to magnify the velocity field [7].

With the purpose of developing an efficient model to restore polluted aquifers, Piscopo et al. [8] developed a novel remediation technique named *Engineered Injection and Extraction*. Their setup is designed as an array of wells that produces an unsteady flow, in which the plume is forced to move. Their model is based on numerical solutions and limited to the 2-D domain. Motivated by these considerations, this work is aimed at developing a 3-D analytical solution for aquifer remediation by engineering-induced injection and extraction system. Our solution is based on the concept of Lagrangian concentration introduced by Fiori [9]. Such framework allows us to calculate the value of local concentration without uncertainty. The efficiency of remediation is quantified by determining the dilution index, as proposed by Kitanidis [10]. Thus, the effectiveness of remediation is analyzed as a function of the characteristic parameters of the system, which describe the interplay between the statistical structure of the hydraulic conductivity, the mechanism of local dispersion, and the fluctuations in the mean flow. Figure 1 shows a sketch of the conceptual model.



**Figure 1.** The conceptual model of combined alternate pumping and medium heterogeneity

## 2. Mathematical framework

The key assumptions of the analytical model are weakly heterogeneity of porous medium, point-like source and slowly oscillating transient flow. This formulation allows us to compare alternative flow configurations and identify those more efficient in term of mixing.

Assuming that better dilution implies more efficient remediation, we use the dilution index  $E$ , introduced by Kitanidis [10] as a global metric to quantify the efficiency of engineering-induced flow oscillations in reducing contaminant concentration. The dilution index quantifies the volume occupied by the plume and is defined as the entropy of the contaminant particles, as follows:

$$E(t) = \exp[H(t)], \quad (1)$$

where  $H$  is the information entropy of the system.

In a recent paper, de Barros et al. [11] developed an analytical solution for Eq. (1) in a Lagrangian concentration framework. Such concentration was idealized by Fiori [5] and is defined as the local concentration projected in reference system that moves with the mass center of the plume. This transformation filters out advection so that only dispersion contributes to plume spreading. According to this framework, Eq. (1) reads as:

$$E(t) = (2\pi)^{3/2} \exp(3/2) \prod_{i=1}^3 \sqrt{W_{ii}}, \quad (2)$$

where  $W_{ii}$  are the covariance of the particle trajectory. For further details, the reader can refer to de Barros et al. [11].

Here, Eq. (1) is extended to transient flows. In order to obtain a simple relationship, we approximate the complex unsteady flow produced by alternate pumping with an oscillatory flow without sink and sources. Therefore, the mean pathline  $\Gamma$  is described by the following expression:

$$\Gamma(t) = [A \cos(\omega_o t) \cos(\omega_f t), A \cos(\omega_o t) \sin(\omega_f t), 0], \quad (3)$$

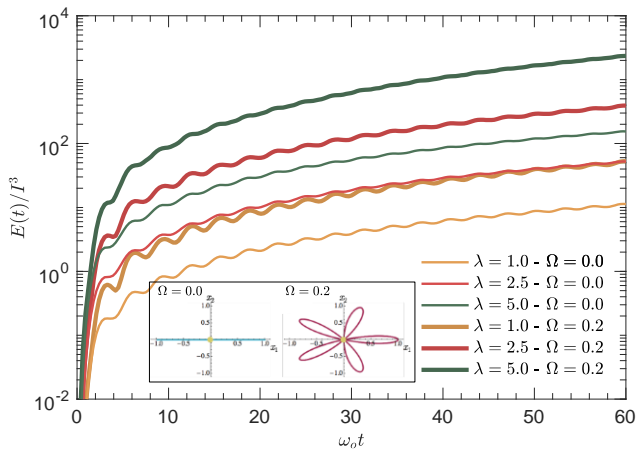
where  $A$  is the amplitude of flow oscillation, and  $\omega_o$  and  $\omega_f$  are angular velocities, describing a linear oscillation and a circulation, respectively. Though approximated, such parametrization can describe reasonable flow configuration that may be created with array of pumping wells, operating alternatively. More precisely,  $A$  is related to the spatial arrangement of the wells, while  $\omega_o$  and  $\omega_f$  depend on the engineered pumping schedule (i.e., the number of the wells and their pumping rate). For further detail, see Di Dato et al. [12].

In order to generalize the results, the analysis will be conducted in a dimensionless form, with the integral scale  $l$  and the  $\omega_o^{-1}$  as a reference of length and time, respectively. The level of medium heterogeneity is described by the hydraulic conductivity log-variance  $\sigma_Y^2$ . The relationship between advection and pore-scale dispersivity, indicated by  $\alpha_d$ , is accounted by the Peclet number  $Pe = l/\alpha_d$ .

### 3. Results

In this section, we will illustrate the behaviour of dilution index as a function of several parameters, describing the engineered setup (i.e.  $\lambda = A/I$  and  $\Omega = \omega_f/\omega_o$ ) and the structure of the aquifer under natural conditions (i.e.  $\sigma_y^2$  and  $P$ ).

#### 3.1. Coupled effect of engineered parameters on dilution



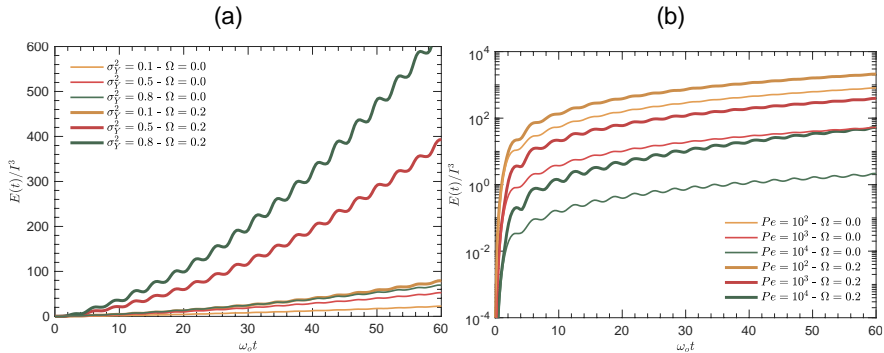
**Figure 2.** Temporal evolution of dilution index as a function of dimensionless time for several values of oscillation ratio and normalized oscillation amplitude

Figure 2 shows the effect of the engineering setup on dilution index. The engineering parameters are the normalized oscillation amplitude  $\lambda$ , which is related to the spatial arrangement of the wells, and the oscillation ratio  $\Omega$ , which describes different pumping schemes. Remediation efficiency increases considerably with  $\lambda$ , since a larger oscillation amplitude indicate a wider mixing volume with fresh water. Therefore, there exists a trade-off between obtaining a larger dilution and increasing the contamination zone.

Moreover, Figure 2 depicts the effect of two different pumping scheme, represented by  $\Omega$ . We compare  $\Omega = 0$ , corresponding to a back-and-forth scheme, and  $\Omega = 0.2$ , corresponding to a rotated scheme. The results indicate that inducing rotations in the transient flow enhances the effectiveness of remediation.

#### 3.2. Coupled effect of alternate pumping and aquifer structure

Figure 3.a shows how hydraulic conductivity variance combined with several pumping schemes enhance dilution. As expected, the effectiveness of remediation increases with medium heterogeneity, which develops solute fingers that steepen the lateral concentration gradients and increase the mass flux between the contaminant and fresh water. The oscillation observed in Figure 3.a indicates that the plume is stretched and shrunk continuously as an effect of the forced fluctuation in the mean flow. Such an oscillating behavior becomes more and more evident by increasing  $\sigma_y^2$ .



**Figure 3.** Temporal evolution of dilution index as a function of dimensionless time for several pumping scheme and (a) several values of medium heterogeneity and (b) several values of Peclet number

Next, Figure 3.b depicts the effect of  $Pe$  on contaminant dilution. Plume dilution shows a strong dependence on pore-scale dispersion, leading to a variation in dilution of about three orders of magnitude for the range of  $Pe$  typically found in natural field conditions. When the pore-scale dispersion is small ( $Pe = 10^4$ , see the green line in Figure 3.b) the main transport mechanism is advection, resulting in visible fluctuations in time evolution of dilution index. By decreasing  $Pe$ , thus increasing the impact of local dispersion on plume dilution, also such fluctuations were smoothed.

As already observed in Figure 2, we highlight that rotated scheme, corresponding to  $\Omega = 0.2$ , produces a larger dilution increment than back-and-forth scheme ( $\Omega = 0$ ).

#### 4. Conclusions

The present work is aimed at developing an analytical solution for aquifers remediation by alternate pumping. Our results highlight that both the scheme of the oscillation path and the aquifer structure parameters control the remediation efficiency. We have observed that inducing a forced rotation in the closed flow paths enhances dilution. More precisely, the more braided is the flow trajectory, the more effective is remediation. Since the efficiency of remediation increases with the amplitude of the flow oscillation, there exists a trade-off between obtaining faster concentration decays and enlarging the contaminated area.

It is emphasized that, besides the theoretical interest, the proposed model can be adapted to enhance plume dilution by near-optimal control of groundwater flow patterns that may be reproduced in the field. The analytical features of the model enable to efficiently screen alternative flow configurations thereby alleviating the computational burden.

## References

- [1] Fetter, C. W.: Contaminant hydrogeology, Waveland Press, 2017.
- [2] Kapoor, V., Kitanidis, P. K.: Concentration fluctuations and dilution in aquifers. *Water resources research*, 34(5), 1181-1193, 1998, doi: 10.1029/97WR03608
- [3] Weeks, S. W., Sposito, G.: Mixing and stretching efficiency in steady and unsteady groundwater flows. *Water resources research*, 34(12), 3315-3322, 1998, doi: 10.1029/98WR02535
- [4] Rolle, M., Eberhardt, C., Chiogna, G., Cirpka, O. A., Grathwohl, P.: Enhancement of dilution and transverse reactive mixing in porous media: Experiments and model-based interpretation. *Journal of contaminant hydrology*, 110(3-4), 130-142, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.10.003>
- [5] Fiori, A., Dagan, G.: Concentration fluctuations in aquifer transport: A rigorous first-order solution and applications. *Journal of Contaminant Hydrology*, 45(1-2), 139-163, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(00\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(00)00123-6)
- [6] Dentz, M., de Barros, F. P. J.: Mixing-scale dependent dispersion for transport in heterogeneous flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 777, 178-195, 2015, doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.351>
- [7] EPA, U.S. Field applications of in situ remediation technologies: Chemical oxidation. Washington DC, EPA, 1998.
- [8] Piscopo, A. N., Neupauer, R. M., Mays, D. C.: Engineered injection and extraction to enhance reaction for improved in situ remediation. *Water Resources Research*, 49(6), 3618-3625, 2013, doi: 10.1002/wrcr.20209
- [9] Fiori, A.: The Lagrangian concentration approach for determining dilution in aquifer transport: Theoretical analysis and comparison with field experiments. *Water resources research*, 37(12), 3105-3114, 2001, doi: 10.1029/2001WR000228
- [10] Kitanidis, P. K.: The concept of the dilution index. *Water resources research*, 30(7), 2011-2026, 1994, doi: 10.1029/94WR00762
- [11] de Barros, F. P. J., Fiori, A., Boso, F., Bellin, A.: A theoretical framework for modeling dilution enhancement of non-reactive solutes in heterogeneous porous media. *Journal of contaminant hydrology*, 175, 72-83, 2015, doi: 10.1016/j.jconhyd.2015.01.004
- [12] Di Dato, M., de Barros, F. P., Fiori, A., Bellin, A.: Improving the Efficiency of 3-D Hydrogeological Mixers: Dilution Enhancement Via Coupled Engineering-Induced Transient Flows and Spatial Heterogeneity. *Water Resources Research*, 54(3), 2095-2111, 2018, doi: 10.1002/2017WR022116

## Nesigurnost modela za procjenu erozije u funkciji varijabilnih ulaznih podataka

Nevena Dragičević<sup>1</sup>, Barbara Karleuša<sup>1</sup>, Nevenka Ožanić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, {nevena.dragicevic; barbara.karleusa; nevenka.ozanic}@uniri.hr

### Sažetak

U ovom je radu analizirana nesigurnost modela temeljenog na metodi potencijala erozije s obzirom na promjenu izvora informacije za parametar koeficijent zaštićenosti pokrova. Ulazni podaci, na kojima se navedeni koeficijent temelji, redom su *Landsat 8* satelitska snimka, *Corine* baza podataka o pokrovu tla te podaci o namjeni zemljišta preuzeti iz Prostornog plana područja posebnih obilježja Vinodolske doline. Definirana su tri scenarija. Prvi se temelji na *Landsat 8* snimci, drugi na Prostornom planu, a treći na *Corine* bazi podataka. Generirana su tri izlaza iz modela (i) koeficijent erozije, (ii) ukupna godišnja produkcija erozijskog nanosa i (iii) ukupna godišnja količina transportiranog vučenog i suspendiranog nanosa riječnom mrežom. Provedena je analiza nesigurnosti modela na temelju uzorka te na temelju cijele populacije. Analiza je upozorila na značajna odstupanja i samog koeficijenta zaštićenosti tla i izlaznih rezultata modela.

*Ključne riječi: Gavrilovićeva metoda, metoda potencijala erozije, prostorna varijabilnost, izvor informacije, erozija tla*

## Uncertainty of the erosion assessment method in the function of variable input data

### Abstract

This paper analyses erosion potential method uncertainty due to a change in the information source for soil protection coefficient. Input data, upon which the coefficient is based, are Landsat 8 satellite image, Corine land cover database and land use data from Spatial Plan of Vinodol Valley. Three scenarios are defined. First is based on Landsat image, second on Spatial plan and the third on Corine database. Three model outputs are generated (i) erosion coefficient, (ii) total annual volume of detached soil and (iii) actual sediment yield. The conducted analysis is based upon sample size as well as upon the entire population. The analysis has indicated significant oscillation both in soil protection coefficient and in model outputs.

*Keywords: Gavrilović method, erosion potential method, spatial variability, information source, soil erosion*

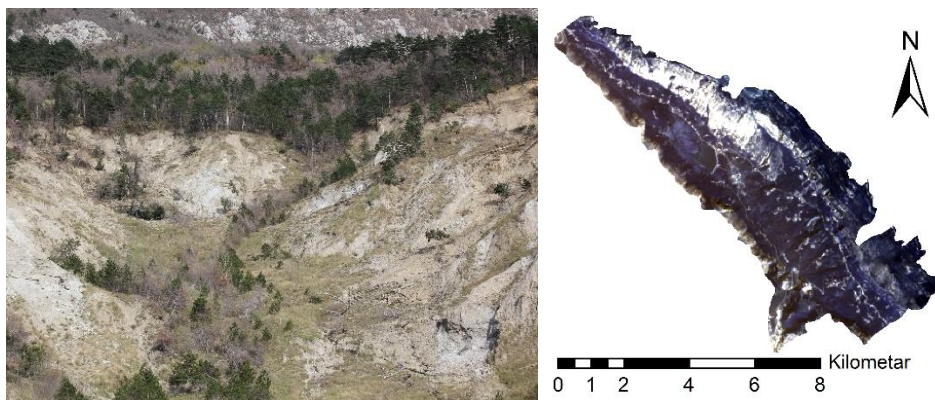
## 1. Uvod

U ovom je radu analizirana parametarska nesigurnost modela temeljenog na metodi potencijala erozije. Ova je metoda namijenjena procjeni erozije za područje Mediterana s karakteristikama bujičnih tokova i krškim terenom. Motivacija za provedbu ovog istraživanja proizlazi iz problema prikupljanja podloga za potrebe izrade modela procjene erozijskih procesa na slivu Dubračine. U Hrvatskoj ne postoje agencije niti institucije koje prikupljaju i vode bazu različitih unificiranih podataka i pokrova tla, koji je predmet analize u ovom radu, i drugih parametara poput vrste tla, temperature, oborina itd. Podaci su dostupni, ali iz različitih raspršenih izvora informacija. Javlja se problem kada su istu podlogu izradili u više navrata različiti izvori (izrađivači). Cilj je ovoga rada ukazati na potencijalni problem u odstupanjima rezultata modela koji proizlaze iz izbora odgovarajućih podloga kada su izrađene i dostupne iz različitih izvora.

## 2. Istražno područje: sliv Dubračine

### 2.1. Karakteristike sliva

Sliv Dubračine (Slika 1) nalazi se u Vinodolskoj dolini smještenoj u Primorsko–goranskoj županiji. Veličine je 43 km<sup>2</sup>, strme topografije s najnižom nadmorskom visinom od 0 m n.m., te najvišom od 920 m n.m. Glavni vodotok, Dubračina, veličine je 13.7 km te ima dvanaest manjih pritoka bujičnog karaktera. Slivno područje karakterizira vodopropusni karbonatni stijenski kompleks u gornjem i vodonepropusni flišni stijenski kompleks u donjem dijelu sliva.



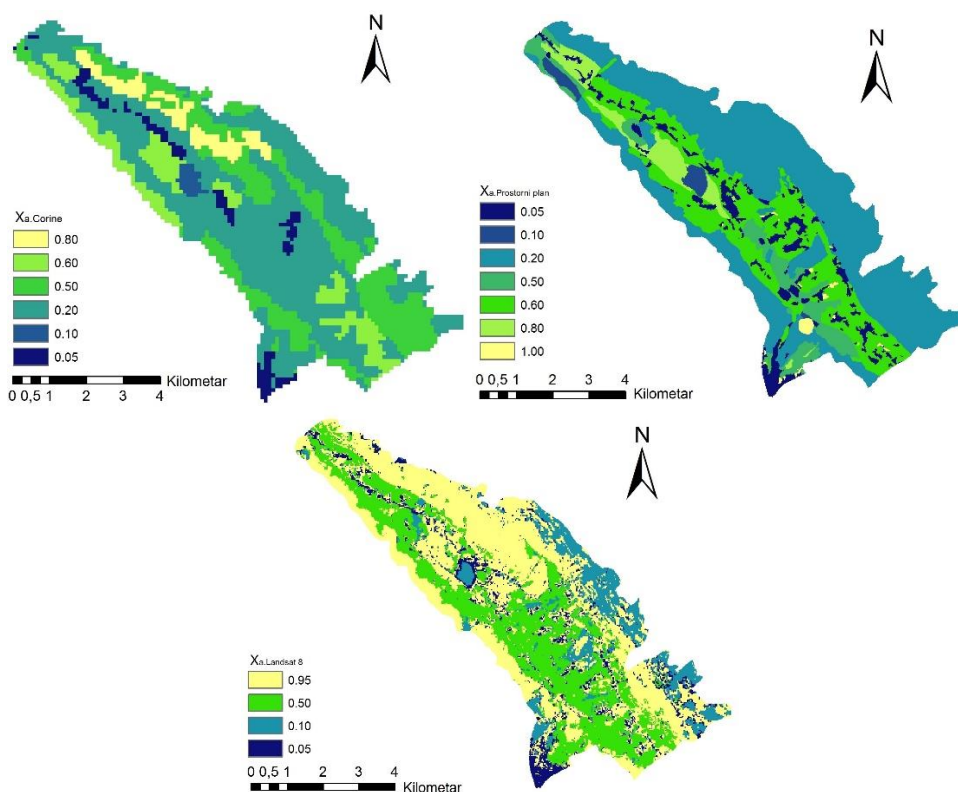
**Slika 1. (a)** područje sliva zahvaćeno ekscesivnim erozijskim procesima **(b)** sliv rijeke Dubračine

Područje sliva Dubračine, a posebno njeni podslivovi Slani potok i Mala Dubračina, područja su izražene erozije i lokalnih klizišta koja ugrožavaju okolna naselja i prometnice.



## 2.2. Ulazni podaci

Prije izrade modela za procjenu erozije, na slivu Dubračine je, zbog nedostatka ulaznih podataka za model, provedeno detaljno istraživanje koje je obuhvatilo niz različitih izvora (DHMZ – Državni hidrometeorološki zavod, općina Vinodol, Hrvatske vode, USGN – *United States Geological Survey*, itd.) te podatke prikupljene obilaskom terena. Za pojedine karakteristike sliva poput pokrova, odnosno namjene tla, te tipa tla dobivene su podloge iz nekoliko različitih izvora informacija. U ovom je radu analiziran utjecaj korištenih podloga različitih izvora informacija za koeficijent zaštite tla (Slika 2) na rezultate modela. Koeficijent zaštite tla temelji se na podacima o pokrovu tla odnosno namjeni tla. Prikupljene su tri podloge. Prva podloga temelji se na *Corine* bazi podataka o pokrovu tla, druga na podacima o namjeni zemljišta preuzetih iz Prostornog plana posebnih obilježja Vinodolske doline, a treća na obradi satelitskih snimki *Landsat 8* preuzetih s USGS baze podataka pomoću ERDAS IMAGINE programskog paketa.



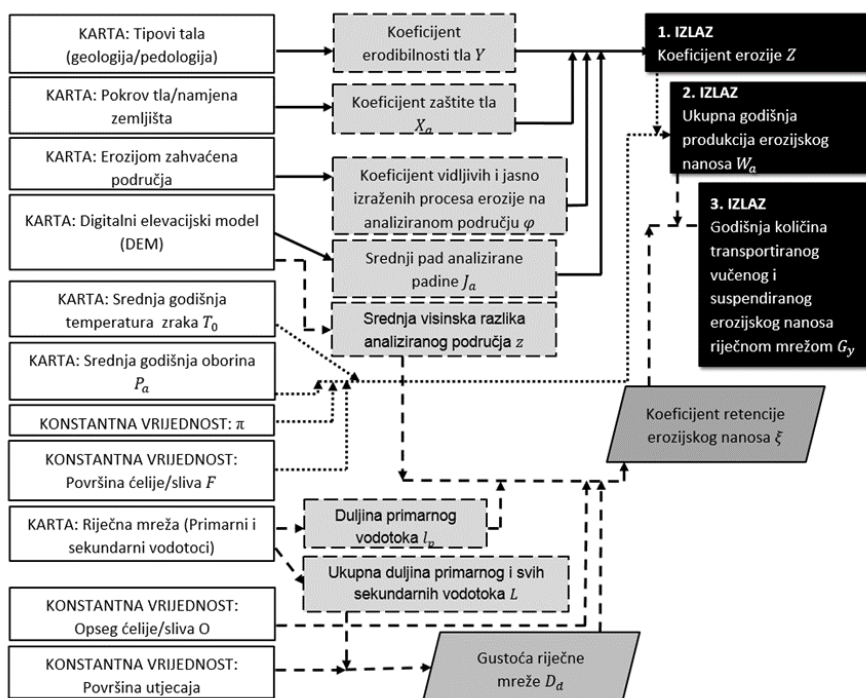
**Slika 2.** Koeficijent zaštite tla generiran na temelju (a) CORINE, (b) Prostornog plana, (c) Landsat 8 satelitskih snimki

Ova tri izvora informacija ponajprije se razlikuju po dostupnoj rezoluciji. Corine podloga rezolucije je 100 x 100 m, Prostorni plan 25 x 25 m, a Landsat satelitske snimke 15x15 m.

Osim rezolucije, razlikuju se i po kategorizaciji zemljišta odnosno pokrova tla. Razlike u rezoluciji i prostornoj distribuciji koeficijenta zaštite tla proizlaze iz navedenih razlika u podlogama.

### 3. Metoda potencijala erozije

Metoda potencijala erozije, također poznata kao Gavrilović metoda [1], razvijena je 60-ih godina prošloga stoljeća na temelju detaljnih terenskih istraživanja na slivnom području rijeke Morave. To je semikvantitativna metoda namijenjena kvantifikaciji erozijskih procesa procjenom potencijala erozije, produkciji erozijskog nanosa i transporta nanosa riječnom mrežom na godišnjoj razini, kartiranju erozije i klasifikaciji bujica. Najčešći rezultati primjene ove metode su ukupna godišnja produkcija erozijskog nanosa, koeficijent erozije i količina transportiranog i vučenog erozijskog nanosa riječnom mrežom (Slika 3) [2]. Ukupna godišnja produkcija erozijskog nanosa je tlo raspoloživo za odvajanje u vremenskom intervalu od jedne godine u metrima kubičnim, uslijed djelovanja erozivnih agenata i specifičnih karakteristika lokalnog područja. Koeficijent erozije je nedimenzionalni parametar koji numerički i opisno daje intenzitet erozije na godišnjoj razini te predstavlja indikator potencijala erozije na nekom području. Količina transportiranog vučenog i suspendiranog erozijskog nanosa riječnom mrežom odnosi se na transportirani nanos za razdoblje od jedne godine, mjereno u nožici sliva [1, 2].



Slika 3. Dijagram toka modela temeljenog na metodi potencijala erozije

Za područje sliva Dubračine izrađen je model u ArcGis programskom paketu koji se temelji na metodi potencijala erozije. Cilj modela bio je izračunati i izraditi karte potencijala erozije, ukupne godišnje produkcije erozijskog nanosa te godišnje količine transportiranog vučenog i suspendiranog erozijskog nanosa riječnom mrežom. Analizirani parametar koeficijent zaštite tla utječe na sva tri rezultata modela, kao što je i vidljivo iz dijagrama toka prikazanog Slikom 3.

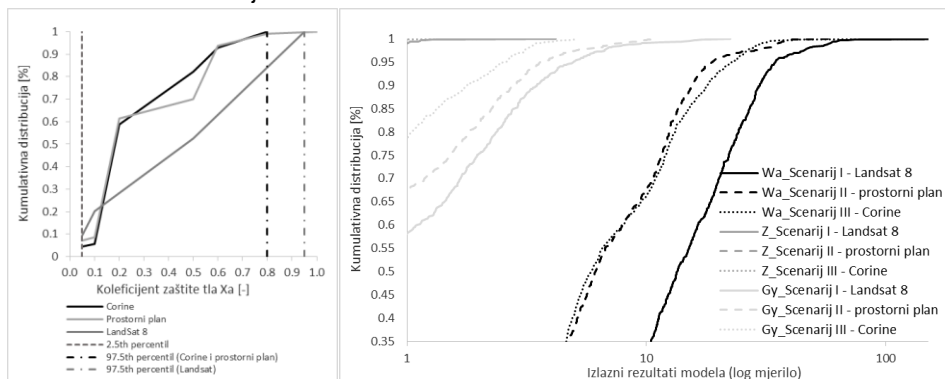
#### 4. Analiza nesigurnosti modela

Analiza nesigurnosti provedena je koristeći dva različita pristupa. Prvi pristup analizira nesigurnost modela s obzirom na izvor informacije na temelju definiranog uzorka (1005 nasumce generiranih točaka primjenom *Geospatial Modelling Environment* i R 8386. 3.2.3. programskim paketima). Drugi pristup analizira nesigurnost modela uzimajući u obzir cijelu populaciju, odnosno cijeli sliv.

Za potrebe analize nesigurnosti modela definirana su tri scenarija. U prvom scenariju pokrov tla se temelji na obradi *Landsat* satelitske snimke, u drugom su korišteni podaci o namjeni zemljišta iz Prostornog plana, a u trećem scenariju korišten je *Corine* pokrov tla.

#### 5. Rezultati modela

Za svaki scenarij generirana su sva tri izlaza iz modela: (i) koeficijent erozije, (ii) ukupna godišnja produkcija erozijskog nanosa i (iii) godišnja količina transportiranog vučenog i suspendiranog nanosa riječnom mrežom. Analiza nesigurnosti provedena na temelju uzorka obuhvatila je deskriptivnu statistiku za parametar koeficijenta zaštite tla te rezultate modela za sva tri scenarija. Srednja vrijednost koeficijenta zaštite tla temeljena na *Corine* i Prostornom planu iznosi 0.35, a za *Landsat* 0.63. Maksimalne i minimalne vrijednosti koeficijenta znatno manje odstupaju, odnosno minimalne vrijednosti za sva tri scenarija iznose 0.05, a maksimalne redom 0.95 (*Landsat*), 1.0 (Prostorni plan) i 0.8 (*Corine*). Na slici 4 prikazana je kumulativna distribucija vjerojatnosti za koeficijent zaštite tla ( $X_a$ ) te izlazi iz modela za sva tri scenarija.



Slika 4. Kumulativna distribucija vjerojatnosti za koeficijent zaštićenosti pokriva i izlazne rezultate modela [3]

Iz prikazanog se može uočiti da se koeficijent zaštićenosti tla značajno razlikuje za svaki izvor informacije, te su razlike vidljive pri usporedbi izlaznih rezultata modela. Isto potvrđuje i analiza nesigurnosti modela koja uzima u obzir cijelu populaciju (Tablica 1). Ukupna međusobna odstupanja vrijednosti koeficijenta zaštićenosti tla u slivu dosežu do 45.5% s obzirom na primijenjeni izvor informacije. Sva tri rezultata modela odstupaju između 23.5% i 50.9%, što je najizraženije kod koeficijenta erozije i ukupne godišnje produkcije erozijskog nanosa.

**Tablica 1.** Nesigurnost izlaznih rezultata modela i odstupanja koeficijenta zaštićenosti pokrova uzimajući u obzir cijelu populaciju [3,4]

Koeficijent zaštite tla $X_a$ [-]	Promjena $X_a$ u odnosu na scenarij 1 [%]	Postotna promjena u izlaznim rezultatima modela u odnosu na scenarij 1		
		[% $Z_f$ ]	[% $W_{a,f}$ ]	[% $G_{y,f}$ ]
Prostorni plan	-45.5	-46.0	-46.9	-23.5
Corine	-45.0	-45.0	-44.7	-50.9

## 6. Zaključak

Analiza prikazana u ovom radu provedena je u cilju definiranja nesigurnosti modela s obzirom na implementaciju određenog izvora informacije za ulazni parametar koeficijenta zaštićenosti tla. Za metodu potencija erozije autori Dragičević i dr. ranije su proveli analizu osjetljivosti metode [5] za 13 njenih parametara. Analizom je zaključeno da je koeficijent zaštićenosti tla parametar s najvećim utjecajem na metodu. S toga je bilo iznimno važno provesti analizu nesigurnosti za ovaj parametar i definirati moguća odstupanja u rezultatima modela koji proizlaze iz primjene različitih izvora informacije. Ova je analiza pokazala da primjena različitih izvora informacije može značajno utjecati na rezultate modela, u ovom slučaju i do 50% odstupanja u njihovim izlaznim vrijednostima.

## Literatura

- [1] Gavrilović, S.: Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji, Izgradnja, specijalno izdanje, pp. 1-292, 1972.
- [2] Dragičević, N., Karleuša, B., Ožanić, N.: A review of the Gavrilović method (erosion potential method) application, Građevinar, 68(9), pp. 715-725, 2016, doi:10.14256/JCE.1602.2016
- [3] Dragičević, N., Karleuša, B., Ožanić, N., Kisić, I.: Effect of Source-Varying Input Data on Erosion Potential Model Performance, Geocarto International, accepted and available online, pp. 1-14, 2018, doi: 10.1080/10106049.2018.1474273
- [4] Dragičević, N., Karleuša, B., Ožanić, N.: Effect of land cover / use change on soil erosion assessment in Dubračina catchment (Croatia), European Water, 57, pp. 171-177, 2017.
- [5] Dragičević, N., Karleuša, B., Ožanić, N.: Erosion Potential Method (Gavrilović Method) Sensitivity Analysis, Soil and Water Research, 12(1), pp. 51-59, 2016, doi:10.17221/27/2016-SWR

## Priprema vode za piće i primjena raspoloživih modela pripreme vode za piće

Tatjana Džeba<sup>1</sup>

(1) Sveučilišta u Mostaru, Građevinski fakultet, Bosna i Hercegovina,  
[tatjana.dzeba@gf.sum.ba](mailto:tatjana.dzeba@gf.sum.ba)

### Sažetak

Imati pitku vodu nameće obvezu i očuvanja i zaštitu od zagađenja preko uspostavljanja zaštitnih zona izvorišta. Ako se zagađenje, pored svih mjera ipak dogodi, potrebno je uvesti tehnike pripreme vode za piće kako bi voda zadovoljavala sve propisane uvjete o zdravstvenoj ispravnosti. U radu su prikazani uobičajeni načini pripreme vode za piće, kao i pregled dostupnih modela za simulaciju kvalitete pitke vode. Štoviše, ovi se modeli koriste za optimizaciju stanica za pripremu vode za piće. Posebno izvješće je dano za modele Otter i Stimela okruženja kao osnove za razvoj novih modela za pripremu pitke vode u okviru međunarodnih projekata. Prezentirani su neki pozitivni primjeri korištenja pojedinačnih procesa iz Stimela okruženja modeliranja u svijetu i kod nas.

*Ključne riječi: osiguranje pitke vode, konvencionalne metode, modeliranje procesa prerade, međunarodna platforma, Stimela okruženje modeliranja*

## Application of different models for management of drinking water quality

### Abstract

Access to safe drinking water imposes an obligation to preserve and protect it against pollution through the establishment of protection zones of the source. If pollution, despite of all the measures still occurs, it is necessary to introduce drinking water preparation techniques so that it meets all the prescribed health conditions. The paper presents conventional drinking water preparation methods along with the review of available models for simulating the drinking water quality. Moreover, these models are used for optimising drinking water production plants. A particular review was given for the Otter and Stimela environment models as a basis for developing new drinking water models within international projects. In this paper some positive examples of using individual processes from the Stimela environment are presented in the world and in our country.

*Keywords: safe drinking water, conventional methods, modeling treatment proceses, international platforms, Stimela modeling environment*

## **1. Uvod**

Voda za piće mora imati fizičke, kemijske, bakteriološke i radiološke karakteristike koje ni pod kojim uvjetima ne smiju imati utjecaj na zdravlje ljudi.

Primjena različitih postupaka i metoda pripreme vode za piće ovisi o raspoloživim resursima vode i njihovim karakteristikama, točnije o veličini i osobinama čestica onečišćenja. U većini stanica za pročišćavanje pitkih voda u svijetu koriste se uobičajene metode: koagulacija i flokulacija, taloženje, filtriranje i dezinfekcija.

Stupanj složenosti pripreme vode za piće i odabir tehnologije ovisi prije svega o uvjetima koje mora ispunjavati voda za piće, kao i o investicijskim, operacijskim troškovima sustava prerade vode i energetskej efikasnosti.

Ispunjenje gore navedenih uvjeta zahtijeva interdisciplinarni pristup i uvođenje postupaka modeliranja i simulacije procesa rada stanice. U pripremi vode za piće modeli se koriste tek od 1990. [1], a razlozi rijetke uporabe modela su u potrebnoj količini podataka za testiranje i kalibraciju, te krutost modela van kalibriranog područja.

U razvijenim je zemljama trend razvoja i primjene modela u blagom porastu, te se razvijaju i međunarodne platforme za razmjenu znanja i iskustava matematskog modeliranja u ovoj oblasti.

Naravno, interes opskrbe pitkom vodom je da se zagađenje spriječi preventivnim djelovanjem. Ako to nije moguće, potrebno je pod danim uvjetima izabrati najbolji tretman pripreme vode za piće.

## **2. Konvencionalne metode i iskustva primjene**

Konvencionalni postupci obrade vode za piće imaju veliku primjenu širom svijeta.

Razlikujemo: stanice za tretman sa sporim filterima, stanice za tretman sa brzim filterima i posebne procese za tretman kao što su oksidacija, adsorpcija i dr.

### **2.1. Stanice za tretman sa sporim, biološkim filterima.**

Spori filteri se koriste za pročišćavanje vode bez prethodnih kemijskih procesa obrade. Tretman vode putem sporih filtera osigurava kvalitetno odstranjivanje suspendiranih čestica i bakterijsko onečišćenje kao i dio organskih zagađenja, a mana im je što zbog malog opterećenja koje primaju, zahtijevaju veću površinu i veći broj radnika za vrijeme čišćenja. Dezinfekcija nakon ovog procesa filtracije ima preventivno značenje..

Spori filteri imaju dvojaku uporabu: prva za obradu voda dosta dobre kvalitete (izvorska voda manje zamućenosti i sl.) za mala naselja, i druga za preradu vode namijenjene infiltraciji u podzemlje, u sklopu velikih sustava za vodoopskrbu. Primjer druge uporabe su dvoslojni spori pješčani filteri za prihranjivanje izvorišta podzemne vode Hardhof u sustavu vodoopskrbe Zuricha [2]. Dobra iskustva s primjenom sporih filtera ima i vodovod Dortmund, kao dio stanice za umjetnu dohranu podzemne vode vodama rijeke Ruhr u cilju osiguranja potrebnih količina pitke vode na ostrvu Hengseng [3].

### **2.1.1. Stanice za tretman s brzim filterima**

Zahtjev za manjim prostorom uvodi uporabu brzih filtera kod kojih su biološki procesi zamijenjeni kemijsko-fizikalnim procesima koagulacije (za pH od 4 do 7 koristi se aluminijev sulfat, a za pH od 8.5 i više, koristi se željezni klorid) i flokulacije (flokulanti mineralnog ili organskog podrijetla, prirodni ili sintetički).

Za racionalan rad brzih filtera treba osigurati istovremeno iskorištavanje visina i sposobnosti filtra za akumulaciju nečistoća. Maksimalna potisna visina filtra mora biti iskorištena nešto prije nego dođe do "probijanja" filtra.

Brza filtracija je najzastupljenija u tretmanima pitke vode. U razvijenijim zemljama sve više je u uporabi postupak membranske filtracije koji je vrlo malo ili nikako povezan za kemikalije, ali dosta skuplji u odnosu na gore opisane konvencionalne metode.

### **2.1.2. Posebni procesi**

Oksidacijska metoda uporabom kemikalija velikog oksidacijskog potencijala prevodi organske i neorganske spojeve u jednostavnije forme s boljim organoleptičkim, toksikološkim i biorazgradljivim karakteristikama nego što su imali početni spojevi. Metoda zahtijeva točno doziranje oksidansa za reakciju, bez ostatka u pročišćenoj vodi, što se ne može provesti bez stručne laboratorijske kontrole i suvremene mjerno-regulacijske opreme. Da ne bi došlo do mogućih negativnih efekata oksidacije, postoje preporuke o količini oksidansa za određeni stupanj zagađenosti vode. Koriste se: ozon, klor i kalij-permanganat. Kod adsorpcijske metode, za razliku od oksidacijske, jedinjenja se ne transformiraju, već se izdvajaju na adsorbentu. Adsorpcija se veoma rijetko koristi kao osnovni proces, ali kao dodatak procesu, može biti efikasna u popravljaju okusa, mirisa, boje, u uklanjanju toksina iz vode kao što su: pesticidi, organski spojevi klora, organski rastvarači, metali i sl. Najveću primjenu ima aktivni ugljen.

## **3. Postojeći modeli i međunarodne platforme modeliranja**

Modeliranje stanica za pripremu vode se uvodi kako bi se osigurala bolja kontrola procesa, optimiziralo projektiranje novih i rekonstrukcija postojećih stanica, te za edukacijske svrhe i temeljna istraživanja procesa [4].

Postojeći modeli razvijeni za podršku procesima pripreme vode za piće su sljedeći:

METREX (TU Duisburg, Njemačka), WTP (EPA USA-Agencija za zaštitu okoliša, SAD), WatPro (Hydromantis, Kanada), TAPWAT (RIVM – Nacionalni institut za javno zdravstvo i okoliš, Nizozemska), OTTER (WRc- Komisija za istraživanje voda, SAD) i STIMELA (TU Delft, Nizozemska).

- METREX je razvijen kao alat za znanstveno-stručno istraživanje, koristi platformu Matlab/Simulink za programiranje, naglasak je na uklanjanju čestica i ozonizaciji, postoji u dvije razine (cijela stanica i pojedinačni procesi), nije fleksibilan i nije aktivno razvijen. U praksi nije korišten.

- WTP je razvijen kao podrška u procesu dezinfekcije, u cilju rješavanja problematike opasnih nusprodukata dezinfekcije. Nije namijenjen za pojedinačne stanice i nije iskoristiv za optimizaciju operacija.
- WatPro je također fokusiran na modeliranje dezinfekcije i njenih nusprodukata, premda podržava i druge procese pripreme. Koristi jednadžbe modeliranja i tehnike kalibracije za svaku jedinicu procesa koje se kasnije povezuju i grafički interpretiraju.
- TAPWAT ima naglasak na određivanje mogućnosti iznalaženja patogenih mikroorganizama i nusprodukata dezinfekcije. Razvijen je prema nacionalnim standardima (RIVM Nizozemska), te je ograničena njegova primjena.

Preostala dva modela OTTER i STIMELA su odabrani kao osnovni okvir za razvoj novog modela u sklopu međunarodne platforme za razmjenu znanja i iskustava o matematičkom modeliranju procesa pripreme vode za piće tzv. TECHNEAU (*Technology Enabled Universal Access to Safe Water*) [5], te se u nastavku daje njihov opis:

- OTTER je paket modeliranja koji je u SAD-u razvila Komisija za istraživanje voda (WRc), gdje se najviše i koristi. Može se koristiti za simulaciju cjelovite pripreme vode u sklopu stanice, ali se uglavnom koristi za simulaciju pojedinačnih procesa. Program se kontinuirano razvija i njegova verzija br. 2. može modelirati rad procesa kao što su: podešavanje pH i kemijskog formiranja flokula, bistenja, brze pješčane filtracije, adsorpcije granularnog aktivnog ugljena (GAC), ozonizacije, dezinfekcije i prerade mulja, a može uključiti preko 50 parametara. Svaki od modela pojedinačnih procesa kodiran je u programskom jeziku FORTRAN i povezan je u grafički međusklop. Za uspješnu kalibraciju i uporabu iziskuje veliki broj podataka i nije primjenljiv van kalibriranog područja
- STIMELA je paket modeliranja koje je razvilo Tehničko sveučilište u Delftu, Nizozemska, u suradnji s Kiwa i DHV Group. Na Zulu jeziku Stimela znači vlak, vlak koji u biti predstavlja stanicu za pripremu pitke vode, a vagoni vlaka su pojedini procesi u pripremi vode za piće. Ovo okruženje modeliranja pogodno je za praktičnu primjenu, ali i za znanstveno i stručno usavršavanje. Izrađen je u Matlab/Simulink-u, procesi su dinamički modelirani i mogu se pratiti u prostoru i vremenu, a može modelirati procese aeracije, brze filtracije, filtracije s granularnim aktivnim ugljenom, omekšavanja i ozonizacije. Svaki od pojedinih modela procesa se kontinuirano razvija, a pojedinačni modeli se mogu povezati.

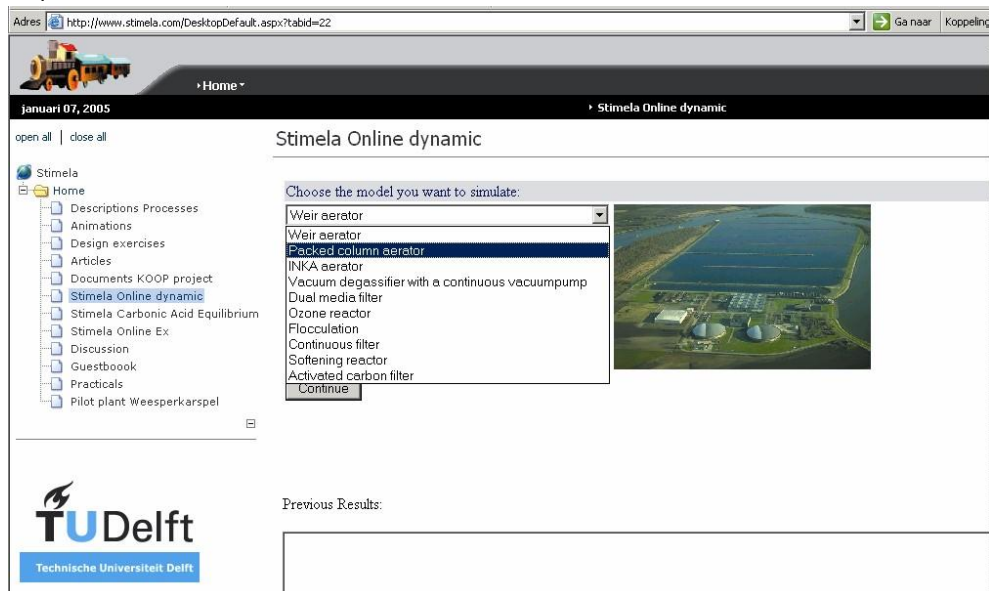
Zadaća TECHNEAU-a, najvećeg istraživačkog projekta za pitke vode koji financira EU, se ogleda u razvoju novog okvirnog okruženja modela za simulaciju procesa pripreme vode za piće u sklopu stanice, uz uporabu pozitivnih karakteristika zadnja dva modela. Prema četvrtom izvješću TECHNEAU projekta [5], razvijen je tzv. SimEau, Europski simulator za pripremu vode. Ova prva verzija uključuje osnovne modele za sirovu vodu i dva procesna modela: Balancing Tankmodel kao jedan od najjednostavnijih dinamičkih modela i Pellet Softening model namijenjen procesu omekšavanja u sklopu pripreme vode za piće.

Plan je razviti i uključiti više drugih procesnih modela (npr. modeli filtriranja, aeracije, dezinfekcije...) usavršavajući i prilagođavajući već raspoložive modele. Slične ciljeve imaju i WaterSPOT i PROMICIT projekti [6].



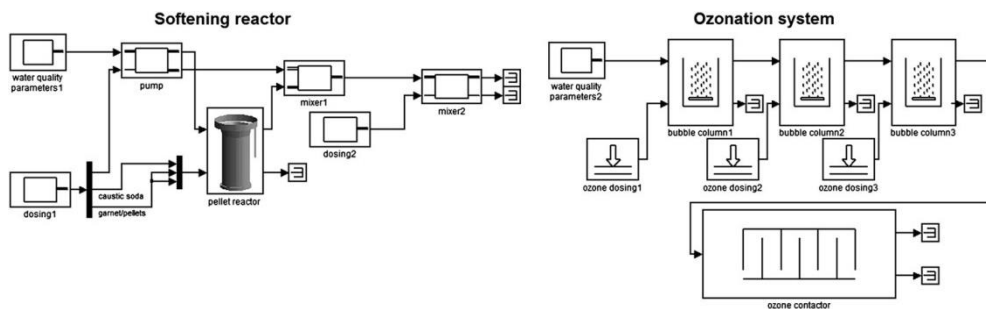
## 4. Primjeri primjene Uporaba Stimela okruženja modeliranja

Dosadašnja uporaba Stimele okruženja u nizozemskim poduzećima za pitku vodu je pokazala da se modeliranjem mogu iznaći određena unaprjeđenja operacija pripreme vode za piće.



Slika 1. Stranica za modeliranje na web sajtu [www.stimela.com](http://www.stimela.com) /preuzeto iz [7].

U Stimela okruženju modela različitih procesa pripreme različit je stupanj razvoja tj. efikasnosti i spremnosti za uporabu pojedinih procesa: npr. aeracija i omekšavanje imaju solidne modele, dok recimo koagulacija i flokulacija je teška za matematsko modeliranje. Modeli pojedinačnih procesa su raspoloživi na stranici [www.stimela.com](http://www.stimela.com) (Slika 1). Stimela okruženje je primijenjeno za modeliranje kontrole procesa omekšavanja na primjeru stanice Wim Mensink iz Amsterdama. Također i na stanici Weesperkarspel tvrtke Waternet u Amsterdamu korišteno je Stimela okruženje modeliranja. Na Slici 2 dan je shematski prikaz procesa omekšavanja i ozonizacije stanice Weesperkarspel.



Slika 2. Shematski prikaz procesa omekšavanja i ozonizacije stanice Weesperkarspel [7].

Stimela modeli razvijeni u Matlab/Simulinku temeljeni su na numeričkoj integraciji parcijalnih diferencijalnih jednačini te mogu pratiti promjene parametara kakvoće u vremenu i prostoru. Moduli pojedinačnih procesa se nalaze u biblioteci modela i mogu se povezivati u tzv. blok dijagram, čime se može procijeniti učinak operacijskih promjena u prethodnim postupcima i time simulirati kompletnu stanicu sa svim pripadnim procesima prerade vode. Model je otvoren, strukturiran, a grafički izlaz je fleksibilan.

Na filter stanicama u Bosni i Hercegovini izvršena je efektivna primjena Stimela modela okruženja na primjeru dvije filter stanice FS Tilave u Sarajevu (iznalaženje optimalnih karakteristika ispune) i FS Crkvice u Zenici (analiza promjene manipulacijsko/operacijskih parametara vezanih za pranje filtera) [8]. Na filter stanici »Crkvice« u Zenici (BiH), gdje se koriste konvencionalni brzi pješčani filteri efikasnom primjenom modela Stimela okruženja, određen je optimalni ciklus filtriranja za različite ulazne zamućenosti sirove vode [9]. Ovim je omogućena optimalna kontrola ciklusa filtriranja, kao operativnog parametra, i time mogućnost smanjenja potrošnje vode za pranje, mogućnost smanjenja troškova crpljenja te vode, kao i smanjenje potrošnje koagulanta.

Pojedini blokovi Stimela okruženja modeliranja nisu dovoljno razvijeni, te postoji mogućnost primjene i razvoja modela pojedinačnog procesa prerade na izvorišta u okruženju koja posjeduju jedan od postupaka prerade pitke vode [10].

## **5. Zaključak**

Modeliranje na stanicama za tretman pitke vode je još uvijek na niskoj razini. Najviše se postiglo u razvijenim zemljama, ali još uvijek nedovoljno i samo na razini pojedinačnih procesa. Međunarodne platforme i projekti koriste pozitivna obilježja Stimela i Otter okruženja modeliranja kao osnovnih modela za razvitak nove okvirne platforme modela pripreme vode za piće. Modeliranje je izazov i realna mogućnost za poboljšanje kvaliteta i pouzdanosti rada stanice, što povlači neophodnost edukacije osoblja u samoj stanici i povezanost sa stručnjacima iz oblasti programiranja. Uporaba modela, automatizacija i centralizacija vodovodnih tvrtki vodi sigurnijoj, kvalitetnijoj i efikasnijoj vodoopskrbi bez isključivog dosadašnjeg oslanjanja na iskustva pojedinaca. U konačnici bi to značilo jednostavnost, održivost, i ekonomičnost.

## **Literatura**

- [1] Dudley, J., Dillon, G., Rietveld, L.C.: Water treatment simulators, Journal of Water supply: Research and Technology-AQUA, Vol.57, No.1, 13-21, 2008., doi: 10.2166/aqua.2008.096.
- [2] Schalekamp, M.: Slow sand filter for Ground Water Recharg (Ten times longer Filter Run that was usual up to now), IWWA Journal, str.1-10,1992.
- [3] Hofman, T.: Kolloidale und suspendierte Partikel: Herkunft, Transport und Relevanz von mobilen Festphasen im Hinblick auf die kunstliche Grundwasseranreicherung, Dortmunder Energie-und Wasserversorgung GmbH, Nr. 56, Dortmund, 1998.

- [4] Rietveld, L.C.: Improving Operation of Drinking Water Treatment through Modeling, Phd Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, University of Technology, Delft, 2005.
- [5] Rietveld, L.C., Ross, P., Dudley, J.: TECHNEAU Wate Treatment Simulator: Modelling Framework (Version 3), TECHNEAU Integrated Project Funded by the European Commission D 5.4.4., 61. 2009.
- [6] van der Helm, A.W.C., Oonincx, M., Lapikas, T., van Schagen, K.M., Rietveld, L.C.: A drinking water treatment plant simulator using real-time plant data for enhanced operator training and model evaluation. *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol 12. (No.2.), 241-249, 2012., doi.org/ 10.2166/ws.2012.132.
- [7] Rietveld, L.C., van der Helm, A.W.C., van der Schagen, K.M., van der Aa, L.T.J.: Good modelling practice in drinking water treatment, applied to Weesperkarspel plant of Waternet, *Environmental & Software* 25 (2010) 661-669., doi:10.1016/jenvsoft.2009.05.015.
- [8] Jusić, S. Primjena Stimela okruženja modeliranja na filter stanicama u BiH, *VODOPRIVREDA* 0350-0519, 45 (2013), 261-263 pp.81-96.
- [9] Jusić, S., Milašinović, Z.: Kontrola ciklusa filtiranja kroz modeliranje, *VODOPRIVREDA* 0350-0519, Vol. 49 (2017), No 285-287 p.147-149.
- [10] Džeba, T.: Primjena Stimela okruženja na izvorištu Radobolja u Mostaru, *Zajednički temelji* 2017, Zagreb, DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.25>.



## Strength grading of structural timber

Barbara Fortuna<sup>1</sup>, Mitja Plos<sup>1</sup>, Tamara Šuligoj<sup>1</sup>, Goran Turk<sup>1</sup>

(1) University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Slovenia,  
{barbara.fortuna; mitja.plos; tamara.suligoj; goran.turk}@fgg.uni-lj.si

### Abstract

All timber used for construction in the EU has to be strength graded and CE marked. To grade a piece of timber we can use visual or machine grading. The procedure to obtain and approve the settings for a new machine or visual standard is described. The approval is restricted to wood species, size of specimen and source of origin. A comparison of visual and machine grading is based on the German DIN 4074-1 visual grading standard and the Slovenian STIG grading machine for Slovenian spruce. The results show that machine grading is a better option, since we can grade to higher strength grades and the number of pieces in a grade is higher. Also, machine grading is faster, easier to implement and more reliable. Machine grading operates in multiple grading combinations, whereas visual grading usually has only one grade combination. To produce the highest grade glulam, machine grading is needed.

*Keywords: strength grading, visual grading, machine grading, timber*

## Ocjena čvrstoće drvene građe

### Sažetak

Sva drvena građa koja se koristi za konstrukcije u EU-u mora biti ocijenjena po čvrstoći te markirana CE oznakom. Ocjena čvrstoće može se provoditi vizualno ili strojno. U radu je opisana procedura za novi standard vizualnog i strojnog ispitivanja. Svaka procedura limitirana je na određenu vrstu drva, dimenzije i izvor građe. Dana je usporedba vizualnog ocjenjivanja građe prema njemačkom standardu DIN 4074-1 i strojnog ocjenjivanja građe koristeći uređaj STIG za slovensku smreku. Prema prikazanim rezultatima, strojno ocjenjivanje je bolje jer je brže, ima veći kapacitet, može ocijeniti drvenu građu bolje kvalitete te je pouzdanije. Vizualno ocjenjivanje, pored drugih nedostataka, vezano je uz jednu konfiguraciju ocjenjivanja dok strojno može obavljati ocjenjivanje u višestrukim kombinacijama. Pouzdano ocjenjivanje drvene građe visoke kvalitete iznimno je važno za zahtjevne drvene konstrukcije, posebice lijepljene lamelirane drvene nosače.

*Ključne riječi: ocjenjivanje čvrstoće, vizualno ocjenjivanje, strojno ocjenjivanje, drvena građa*

## 1. Introduction

All products, used in construction in the European member states, have to be marked with CE marking. Affixing the mark, a manufacturer with the declaration of conformity takes over the responsibility for the conformity of the product with its declared performance [1] and that the product complies with the harmonized standards and therefore meets the essential requirements of the European Council's Regulation for construction products [2]. Strength grading of structural timber is regulated with a set of harmonised standards EN 14081 [3, 4] for timber with a rectangular cross-section. Timber is sorted based on its mechanical properties, i.e. strength, stiffness and density into strength grades or strength classes. Despite the name, strength grading is not always governed by the strength itself since stiffness and density are also the grade determining properties [5]. The objective of this paper is a presentation of some basic terms and procedures that are directly connected with strength grading of timber.

## 2. Strength grade

The European standard EN 338 Structural timber – Strength Classes defines strength grades or strength classes as groups of specimens/elements of the same species and sources with similar strength properties. Strength properties are described with three grade-determining properties: strength (*MOR*), modulus of elasticity (*MOE*) and density ( $\rho$ ). In order to assign specimens to a specific strength grade, the characteristic values of the three grade determining properties (*GDP*) have to meet the requirements, that is a 5<sup>th</sup> percentile value for *MOR* and  $\rho$  and a mean value for *MOE*.

Strength grades are defined for bending strength tests for softwoods (C-grades) and hardwoods (D-grades) and tension strength classes for softwood (T-grades). Classes are designed so that they fit well to the property profiles of most common species [5].

The methods of strength grading of structural timber with rectangular cross-section are defined by the set of EN 14081 and supporting standards. The standard gives two options, visual and machine grading. For both, the assignments to strength grades can be made on the basis of comprehensive testing and analysis. Before use, the results need to be presented for confirmation in a grading report and approved by Task Group 1 (TG1) of the European standardization committee (CEN/TC 124/WG2/TG1).

When determining a grade, one cannot just take a piece of timber and non-destructively, or destructively for that matter, determine the board's strength grade [6]. To determine, for example, the 5 % value at least 20 pieces in each grade are needed. Moreover, if we take a sample of timber boards and try to determine their grades, another problem appears. Namely, the question about the grade combination that we want to use to allocate the pieces. As an example, we took 1020 boards and optimally graded them to a grade combination with a single grade (C24) and to a grade combination with two grades (C40 and C24). As we can see in Table 1, the number of pieces that were allocated to C24 grade are not the same. Even if we sum the number of the boards in C40 and C24 for the latter combination, we only get 890 boards in grade C24 or higher. Whereas if we take the first

combination with only one (C24) grade, we get 999 boards in grade C24 or higher. These differences are due to the statistical definition of timber grades and need to be understood and considered.

**Table 1.** Allocation of boards to optimum grades in cases of two different grade combinations, only C24 and C24 - C40.

Optimum grading	Grade combination	
	C24	C40 - C24
Number of boards in a grade	C40	550
	C24	999
	Reject	130
	Total	1020

### 3. Strength grading

Visual grading is the basic method of strength grading. Structural timber has to be visually inspected and specified visual parameters have to be evaluated according to the valid grading rules, defined by a validated national standard. When visually grading, we measure the physical anomalies in timber like knots, ring width, the slope of grain, pith, wane and so on. Visual standards give the maximum values of these characteristics for a certain grade. The number of grades into which one can grade is also predefined by the standards and has to be followed. Since visual grading can be very subjective, the highest grades from EN 338 are not represented in the standards, so one can only grade to the lower half of the grades [7]. In Slovenia there was no national standard, therefore DIN 4074-5 was used. The valid transformation from visual grades to the corresponding strength grade in the EN 338 are listed separately for softwoods and hardwoods in the EN 1912 standard, per species and source of timber.

Machine grading is a more advanced method of strength grading which should enable safer, more objective and more reliable strength grading. Timber is sorted by a machine measuring one or more physical timber properties. EN 14081 defines output and machine-controlled grading. In Europe, mostly machine-controlled grading is used. Recently, the first Slovenian strength grading machine was approved by TG1 for spruce and fir. For the derivation of the settings for a new machine, a sample with the minimum of 900 boards has to be tested. To obtain a representative sample, each board has to be sawn from a different log and at least four sub-samples of 100 boards have to be created. All the specimens have to be non-destructively tested and the indicating property (IP) has to be measured with the strength grading machine. The IP can be any physical characteristic measured by the machine. In our work we used a sound propagation machine from the Slovenian company ILKON d.o.o. called the STIG strength timber grading machine. The STIG uses the dynamic modulus of elasticity ( $E_{dyn}$ ) as the IP. The machine determines the 1<sup>st</sup> eigen frequency from the measured audio signal of a hammer impact on the end of the specimen. After we concluded with the non-destructive measurements, the specimens were destructively tested. Bending

$MOR$ ,  $MOE$  and  $\rho$  were measured and calculated according to standards EN 408 and EN 384.

### 3.1. Derivation of the settings

The first step of the settings derivation is the selection of the grade combination into which the pieces will be sorted. It is not possible to uniquely determine the strength grade of a specific piece. The same piece can be graded into different grades, depending on the selected grade combination and on the properties of other pieces from the sample.

It is rather sensible to select such a grade combination that pieces are as evenly distributed as possible and selected grades are not too close to each other (e.g. C30 - C27).

#### 3.1.1. Optimal grading

Before determining the final settings, optimal grading of the pieces must be carried out. Optimal grading is defined in EN 14081-2. Graded pieces are sorted, fulfilling the required values of the grade determining properties (GDP), into the highest possible grades within the selected grade combination. The so determined grade of a piece is its optimum grade.

#### 3.1.2. Grade assignments

After the determination of optimum grades of the pieces, they need to be sorted into the assigned strength grade based on the IP determined by the machine. Pieces should be ranked by their IP and, based on the calculated characteristic values of GDPs, assigned to strength grades. The IP value of the last piece that fulfils the required GDP values is considered as the setting for that strength grade. As a result, each piece can be described with its optimum and assigned grade. In order to ensure sufficient safety of the strength grading, size and cost matrices have to be calculated for each grade combination. The values in the size matrices represent the numbers of correctly graded (assigned) pieces (on the diagonal), wrongly downgraded pieces (above the diagonal) and wrongly upgraded pieces (under the diagonal). The numbers of wrongly upgraded pieces are limited indirectly by the maximum value of 0,20 in the cells in the global cost matrices, which is formed on the basis of size matrix and prescribed penalties for wrongly assigned pieces.

The described procedure was made for the STIG strength timber grader on 1020 pieces of Slovenian spruce and fir (*Picea abies* and *Abies alba*). In order to get a representative sample for the whole of Slovenia, specimens were collected from four different growth areas with four different cross section (40 x 100 mm, 50 x 150 mm, 44 x 210 mm, 140 x 140 mm). The settings were derived for four different grade combinations.

Settings, timber source, species and cross-sectional dimensions for which settings can be used were presented in the report for approval in the ITT (Initial Type Testing) table. In Table 2, a section of the ITT is presented.

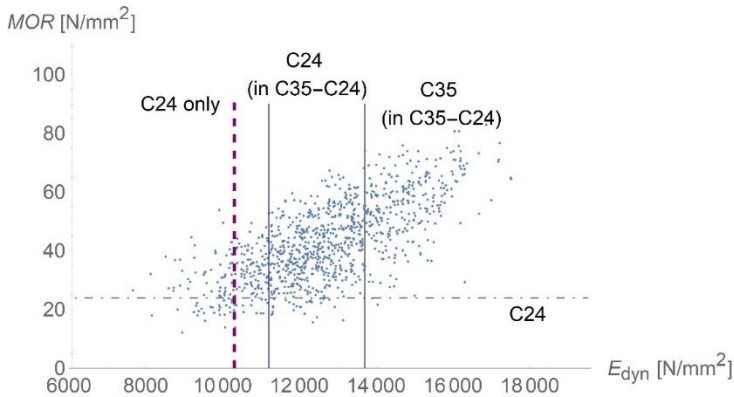
We can see that the settings or the limit values for a grade can change depending on the grade combination. If we look at the values for C24 we can see that the setting of the IP changes from 10300 when grading to solely C24 to 11200 when grading to C24 and C35. This is due to the fact that the pieces with the highest GDP are allocated to C35, which leaves us with lower quality pieces. From these low-quality pieces we need to exclude more



of the lowest quality pieces to achieve the required GDP criteria. This is illustrated in Figure 1 where the scatter plot of all the boards is displayed along with the two settings for C24 grade.

**Table 2.** Section of the ITT table for STIG Strength timber grading machine

Permitted timber size (mm)	Grade or grade combination	Settings ( $IP=\bar{E}_{dyn}$ )
$36 \leq t_n \leq 154 \text{ mm}$ $90 \leq b_n \leq 230 \text{ mm}$	C40	15000
	C24	10700
	C35	13700
	C24	11200
	C30	12800
	C18	8870
	C24	10300



**Figure 1.** MOR and measured  $E_{dyn}$  of the 1020 spruce and fir boards with the STIG settings of the boards for the grade combination of solely grade C24 (dashed lines; left) and grade combination C35-C24 (solid lines; right).

The correlation between the IP of the STIG machine and the strength was around 0.7. That might not seem high, but if we make a comparison between the output of the STIG and the DIN 4074-1, which is presented in Table 3, we can see that machine grading is a much better option and that, although conservative, visual grading is also a viable option.

Since the most used grade is currently C24, we present at the efficiency of the two systems grading to this or higher grades. Visual grading is able to grade 68 % of the boards to C24 or higher, whereas machine grading delivers 81 % of the boards. If we look beyond C24, visual grading allocates 10 % to C30 and machine grading allocates 28 % to grade C35. On top of that, using the STIG we can even expect to allocate 10 % of the boards to C40. With C40 grade material, we can produce glulam beams with the highest strength grade (GL32).

**Table 3.** A comparison between the effectiveness of machine grading (STIG) and visual grading (DIN 4074-1) on spruce boards

Visual grading			Machine grading		
	Optimum grading	DIN 4074-1		Optimum grading	STIG
C30	86 %	10 %	C35	72 %	28 %
C24	3 %	58 %	C24	15 %	53 %
C18	8 %	15 %			
Reject	3 %	17 %	Reject	13 %	19 %

#### 4. Conclusion

The strength grade of a piece of timber can be determined either through visual or machine grading. Both methods are adequate, but machine grading is more reliable, precise and can be used for grading into higher grades. It is worth mentioning that time needed to properly visual grade a single board exceeds several minutes, while machine grading is much faster.

#### Literature

- [1] Regulation (EU) No 305/2011 of the European parliament and the council of the European Union, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:EN:PDF>, 12. 7. 2018.
- [2] Council Directive 89/106/EEC Construction products (CPD) of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulation and administrative provision of the Member States relating to the construction products, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31993L0068>, 12. 7. 2018.
- [3] EN 14081-1: Timber Structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. General requirements, Brussels, 2016.
- [4] C 92/139: Commission communication in the framework of the implementation of Regulation (EU) No 305/2011, Official Journal of the European Union, 2018/C 092/06. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.C\\_.2018.092.01.0139.01.ENG](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.C_.2018.092.01.0139.01.ENG), 12. 7. 2018
- [5] Ridley-Ellis, D., Stapel, P., Baño, V.: Strength grading of sawn timber in Europe: and explanation for engineers and researchers. European journal of wood and wood products, 74(3), pp: 291-306, 2016, doi: 10.1007/s00107-016-1034-1.
- [6] Stapel, P., Van de Kuilen, J.-W.: Effects of grading procedures on the scatter of characteristic values of European grown sawn timber. Materials and Structures, 46(9), pp: 1587-1598, 2013, doi: 10.1617/s11527-012-9999-7.
- [7] Stapel, P., Van de Kuilen, J.-W.: Efficiency of visual strength grading of timber with respect to origin, species, cross section, and grading rules: a critical evaluation of the common standards. Holzforschung, 68(2), pp: 203-216, 2014, doi: 10.1515/hf-2013-0042.

## Praćenje pukotina u betonu primjenom digitalne analize slike

Marina Frančić Smrkić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, [mfrancic@grad.hr](mailto:mfrancic@grad.hr)

### Sažetak

Digitalna analiza slike je beskontaktna optička metoda za mjerenje pomaka i deformacija na temelju usporedbe digitalnih fotografija mjernog područja pri različitim fazama opterećenja. Njezine prednosti pred drugim metodama su jednostavnost za upotrebu i ekonomska prihvatljivost. U radu su prikazani i uspoređeni rezultati mjerenja širina pukotina na armiranobetonskim uzorcima dobiveni digitalnom analizom slike i LVDT osjetilima. Oprema korištena za digitalnu analizu slike u ovom radu sastoji se od običnog digitalnog fotoaparata, osobnog računala i besplatne verzije komercijalnog programa za analizu fotografija.

*Ključne riječi: digitalna analiza slike, širina pukotina, eksperimentalno istraživanje*

## Concrete crack monitoring using digital image correlation

### Abstract

Digital Image Correlation (DIC) is a non-contact optical technique for measuring displacement and strain. DIC works by comparing digital photographs of a test area at different stages of loading. The advantages of this method are that it is simple to use and cost effective. This paper presents and compares the results of crack width on reinforced concrete elements measured by the DIC method and by LVDT sensors. The equipment used for this research consists of a plain digital camera, personal computer and free version of the commercial software for digital photograph analysis.

*Keywords: digital image correlation, crack width, experimental research*

## 1. Uvod

Digitalna analiza slike (eng. *DIC – Digital Image Correlation*) je beskontaktna optička metoda za mjerenje pomaka i deformacija, a temelji se na principu usporedbe digitalnih fotografija mjernog područja pri različitim fazama opterećenja [1]. Sustav radi na principu praćenja blokova piksela koji za tu namjenu moraju biti nasumični, jedinstveni i s dobrim kontrastom. Površina se priprema za mjerenje najčešće špricanjem boje iz spreja [2].

Digitalna analiza slike pokazala se vrlo efikasnom za mjerenje širina pukotina u betonu jer omogućuje kontinuirano praćenje širenja pukotine. Posebno je korisna u početnoj fazi nastanka pukotina kada one još nisu vidljive okom ili mikroskopom [3]. Kod korištenja LVDT (eng. *Linear Variable Differential Trasformer*) osjetila za mjerenje širine pukotina uvijek postoji opasnost da se pukotina možda neće otvoriti unutar mjernog područja ili da će se pojaviti više pukotina što može otežati naknadnu interpretaciju rezultata. Primjenom digitalne analize slike možemo pratiti neograničen broj pukotina, svaku zasebno, unutar istog mjernog područja.

Velika prednost digitalne analize slike u odnosu na konvencionalne metode mjerenja je trošak opreme. Oprema korištena u ovom istraživanju uključuje osobno računalo, digitalni fotoaparati i besplatnu verziju komercijalnog programa za analizu slike GOM Correlate.

## 2. Eksperimentalni rad

Ispitivanje je provedeno na armiranobetonskim uzorcima dimenzija 240 cm x 50 cm x 18.5 cm. Uzorci su ispitani savijanjem u četiri točke s razmakom oslonaca od 220 cm. Opterećenje je nanošeno pomoću hidrauličkog dinamičkog ispitnog stroja Zwick/Roell kapaciteta 600 kN, kontrolom pomaka s brzinom od 3 mm/min, u koracima od 25 kN s rasterećenjima. Relativne deformacije, preko kojih su izražene širine pukotina, mjerene su na tlačnoj strani uzoraka LVDT osjetilima postavljenim na mjernoj bazi od 200 mm u sredini raspona.

Uz LVDT osjetila, širine pukotina mjerene su i pomoću digitalne analize slike. Jedna bočna strana uzorka pripremljena je za mjerenje tako da se špricanjem boje iz spreja na površinu nanio nasumični točkasti uzorak (Slika 1).



**Slika 1.** Površina uzorka pripremljena za digitalnu analizu slike

Pri ispitivanju se koristio digitalni SLR fotoaparat Canon EOS 700D maksimalne rezolucije 5184 x 3456 piksela. Koristio se objektiv Canon EF-S fokalne duljine od 18 mm do 55 mm, maksimalnog otvora blende F/3.5 za fokalnu duljinu 18 mm i F/5.6 za fokalnu duljinu 55 mm. Fotoaparat je bio spojen na računalo i upravljao preko programa *digiCamControl*. Digitalni fotoaparat je prilikom ispitivanja bio pričvršćen za tronožac na koji je obješen uteg mase 10 kg radi stabilizacije i smanjenja vibracija. Tronožac je bio udaljen otprilike 1 m od uzorka, a optička os fotoaparata usmjerena okomito na površinu uzorka koja se snimala. Postavke fotoaparata prikazane su u Tablici 1.

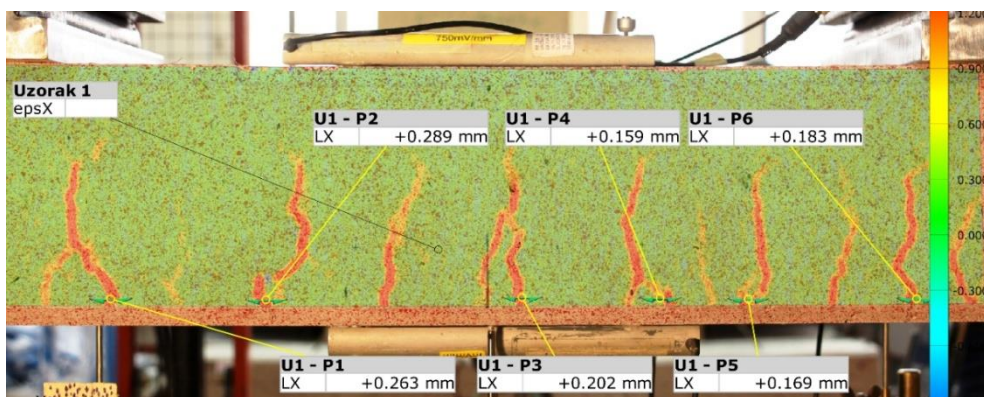
**Tablica 2.** Tablica 1. Postavke fotoaparata

Ekspozicija	1/25 s
Otvor blende	F/5.6
Osjetljivost senzora	ISO 800
Fokalna duljina	42 mm

Za obradu digitalnih fotografija korištena je besplatna verzija komercijalnog programskog paketa *GOM Correlate*. Program radi na principu usporedbe digitalne fotografije snimljene u nekom trenutku ispitivanja s bilo kojom drugom fotografijom tijekom ispitivanja. Sve fotografije snimljene tijekom ispitivanja uspoređivane su s referentnom fotografijom snimljenom na početku ispitivanja. Upravo je zato važno da na referentnoj fotografiji nema pomaka i deformacija, tj. da ona predstavlja nultu, rasterećeno stanje, a sve naknadne fotografije predstavljaju relativno stanje uzorka u odnosu na referentnu fotografiju.

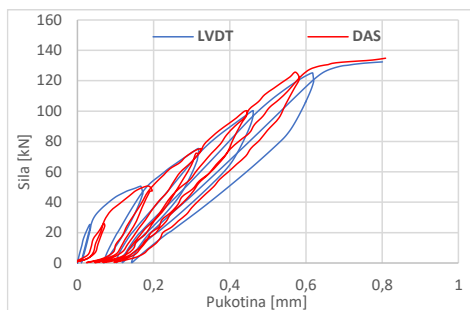
### 3. Rezultati

Velika prednost digitalne analize slike je mogućnost praćenja širine svake pojedine pukotine na uzorku. Na Slici 2 vidljiv je grafički prikaz pukotina dobiven digitalnom analizom slike. Mjerna mjesta za mjerenje širina odabranih pukotina postavljena su kao virtualni ekstenzometri preko šest najvećih pukotina na uzorku.

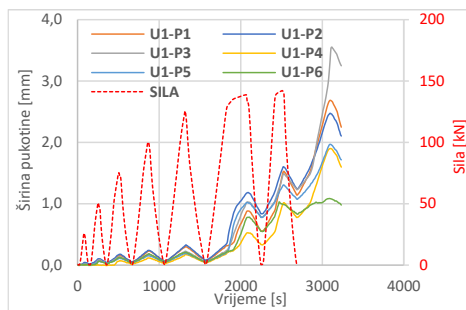


**Slika 2.** Grafički prikaz pukotina na uzorku dobiven digitalnom analizom slike

Na Slici 3 je prikazana usporedba širina pukotina na mjernoj bazi od 200 mm dobivena pomoću LVDT osjetila i digitalne analize slike (DAS). Primjećuje se relativno dobro podudaranje rezultata. Ovi se rezultati odnose na ukupnu širinu pukotina koja se otvorila na toj mjernoj bazi tj. riječ je o ukupnoj širini nekoliko nastalih pukotina u toj mjernoj zoni. Pri većoj širini pukotina (od oko 0.8 mm) došlo je do odljepljivanja LVDT osjetila pa je nakon toga mjerenje nastavljeno pomoću digitalne analize slike. Širine šest najvećih pukotina na uzorku i njihovo širenje tijekom vremena prikazano je na Slici 4.



**Slika 3.** Usporedba širina pukotina pomoću dvije metode



**Slika 4.** Širenje pukotina u vremenu

## 4. Zaključak

Digitalna analiza slike ima nekoliko prednosti kod mjerenja širina pukotina u odnosu na mjerenje LVDT osjetilima. Ova metoda omogućuje praćenje svake nastale pukotine zasebno te omogućuje praćenje širine pukotina i pri vrlo velikim pomacima pri kojima LVDT osjetila najčešće izgube kontakt s uzorkom te dolazi do njihovog odljepljivanja. Najveća prednost ove metode ispitivanja jest cijena samog ispitivanja jer je za provedbu ispitivanja potreban samo digitalni fotoaparat, osobno računalo i besplatna verzija komercijalnog programa za digitalnu analizu fotografija. Mjerenje širina pukotina LVDT osjetilima pruža visoku preciznost i točnost, ali je i znatno skuplje zbog cijena senzora i uređaja za prikupljanje podataka.

Cilj ispitivanja bio je usporediti rezultate mjerenja širine pukotina na betonskim uzorcima dobivene digitalnom analizom slike u odnosu na rezultate mjerenja LVDT osjetilima. Digitalna analiza slike pokazala se vrlo jednostavnom i ekonomski prihvatljivom za upotrebu, uz zadovoljavajuću točnost dobivenih rezultata.

## Literatura

- [1] McCormick N., Lord J.: Digital Image Correlation, *Mater Today*, 2010;13(12):52–4
- [2] Frančić Smrčić M.: Otpornost betonskih elemenata armiranih recikliranim čeličnim vlaknima pri zamoru, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.
- [3] McCormick N.: Digital image correlation for structural measurements, *Proc Inst Civ Eng*, 2012;165:185–90., doi:10.1680/cien.11.00040.

## Numeričko modeliranje točkastih toplinskih mostova ventiliranih fasadnih sustava

Mergim Gaši<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, [mgasi@grad.hr](mailto:mgasi@grad.hr)

### Sažetak

Povećanje energetske učinkovitosti zgrada dovelo je do povećanja potrebe energetskih obnova vanjske ovojnice zgrade. Među najčešće korištenim rješenjima su sustavi ventiliranih fasada i to zbog više razloga – boljih toplinskih svojstava, bolje kontrole vlage, estetike, itd. Takvi sustavi koriste metalne nosače za pričvršćenje vanjskih fasadnih elemenata koji uzrokuju toplinske mostove, a energetski proračun takvih fasada se uglavnom provodi kao u ETICS sustavima. Zanemarivanje toplinskih mostova može dovesti do nepredviđenih toplinskih gubitaka. Cilj ovog rada je određivanje utjecaja toplinskog mosta preko točkastog koeficijenta prolaska topline  $\chi$  na mjestu prodora čeličnih pričvrsnica kroz sloj toplinske izolacije, te povećanja koeficijenta prolaska topline  $U$  zbog prisutnosti točkastih toplinskih mostova. Za analizu je napravljen numerički model u računalnom programu *AnTherm*, te su se varirali različiti materijali pričvrsnica fasadnog elementa i betonskih slojeva u cilju smanjivanja toplinskih gubitaka kroz točkaste toplinske mostove.

*Ključne riječi:* toplinski mostovi, točkasti koeficijent prolaska topline, koeficijent toplinske veze, *AnTherm*, *Eco-Sandwich*

## Numerical modelling of the point thermal bridges of systems of ventilated facades

### Abstract

Increasing energy performance of buildings has led to an increase of energy retrofit of building envelopes. Amongst mostly used solutions are systems of ventilated facades due to a variety of reasons – better energy performance, moisture control, aesthetics, etc. Those systems use metal profiles for fastening outer facade elements, and thermal performance of these systems is treated in the same way as ETICS. Neglecting of thermal bridges can lead to unforeseen heat losses through the building envelope. Aim of this paper is a determination of the point thermal transmittance  $X$  of point thermal bridge caused by penetration of steel fasteners through thermal insulation layer and calculation of the increase in the heat transfer coefficient  $U$  due to the presence of point thermal bridges. For analysis Numerical model was created in software *AnTherm* where different materials for fasteners and concrete layers were varied for reducing thermal losses through point thermal bridges.

*Keywords:* thermal bridges, point heat transfer coefficient, thermal coupling coefficient, *AnTherm*, *Eco-Sandwich*

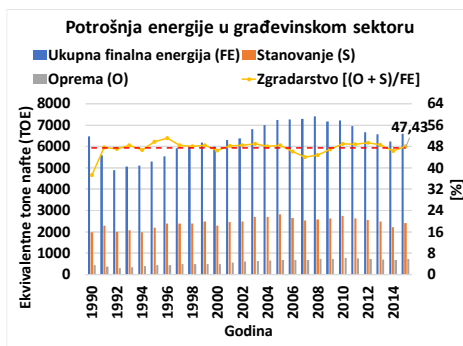


## 1. Uvod

U pogledu potrošnje energije građevinski sektor je jedan od najznačajnijih potrošača – 40 % ukupno potrošene energije otpada na zgrade [1]. U Hrvatskoj je taj iznos čak i veći pa je 2015. godine iznosio 47.97 % od ukupne finalne energije potrošene u toj godini, uzevši u obzir potrošnju za stanovanje i opremu zgrade. U ovom će radu biti opisan numerički model kojim će se procijeniti toplinski gubitci kroz točkaste toplinske mostove nastale zbog čeličnih pričvrsnica koje nose vanjski sloj betona u predgotovljenom fasadnom sustavu zvanom ECO-SANDWICH® (Slika 1).



a)



b)

**Slika 1.** Predgotovljeni ventilirani betonski fasadni panel (a) [2] i Potrošnja energije u Hrvatskoj u periodu od 1990. do 2015. (b) (prema podacima iz [1])

ECO-SANDWICH® je predgotovljeni ventilirani betonski fasadni panel s ugrađenom toplinskom izolacijom [3]. Vanjski fasadni sloj je izgrađen od betona s recikliranom opekama, sloj toplinske izolacije izgrađen je od mineralne vune, a unutarnji nosivi sloj je izgrađen od betona s recikliranim agregatom. Tablica 3 prikazuje debljine slojeva i toplinske karakteristike pojedinih materijala korištene pri izradi numeričkog modela opisanog u poglavlju 3.

**Tablica 3.** Debljine slojeva i toplinske karakteristike pojedinih materijala

Slojevi	$\lambda$ [W/mK]	$c$ [J/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d$ [m]
Vanjski beton s recikliranom opekama	0.746	1000	1971	0.06
Zračni sloj	0.226	1000	1.20	0.04
Mineralna vuna	0.034	1000	80	0.20
Unutarnji beton s recikliranim agregatom	0.858	1000	2105	0.12
Čelik/Nehrđajući čelik	50/15	450/460	7850	$\Phi = 8$ mm
FRP	0.31	1670	1000	$\Phi = 8$ mm
Armirani beton	2.6	1000	2500	0.06/0.04



U Tablica 3  $\lambda$  je toplinska provodljivost,  $c$  je specifični toplinski kapacitet,  $\rho$  je gustoća i  $d$  je debljina pojedinog sloja. Promjer šipki iznosi 8 mm.

U normi HRN EN ISO 10211 toplinski most je definiran kao manje područje u omotaču grijanog dijela zgrade kroz koje je toplinski tok povećan zbog promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela zgrade [4]. Toplinski mostovi se mogu pojaviti u jednoj točki ili na određenoj duljini. Najčešći tipovi toplinskih mostova koji se pojavljuju prilikom projektiranja energetskih zahtjeva zgrade su toplinski mostovi na spojevima građevinskih elemenata. Ti toplinski mostovi se nazivaju linijskim toplinskim mostovima i kvantificiraju se duljinskim koeficijentom prolaska topline  $\Psi$  [W/mK]. Njihov proračun je uglavnom jednostavniji od proračuna točkastih toplinskih mostova budući da se u većini slučajeva linijski toplinski mostovi mogu svesti na dvodimenzionalne toplinske tokove, dok je prolazak topline kroz točkaste toplinske mostove uvijek trodimenzionalan.

Proračun toplinskih gubitaka kroz točkaste toplinske mostove je kompliciraniji od proračuna toplinskih gubitaka kroz linijske toplinske mostove. Zbog toga se kod proračuna toplinskih gubitaka utjecaj točkastih toplinskih mostova uglavnom zanemaruje. Kod zgrada gotovo nulte energije (nZEB) i pasivnih kuća odluka zanemarivanja točkastih toplinskih mostova može dovesti do povećane potrošnje zgrade u odnosu na projektirane vrijednosti. Studije pokazuju da čelični profili koji se koriste za pričvršćivanje fasadnih elemenata, koji probijaju sloj toplinske izolacije, dovode do smanjenja toplinskog otpora u okolini točkastog toplinskog mosta i to do dva puta [5] [6]. Ako se ti toplinski gubitci ne uzmu u obzir, zgrada bi se mogla svrstati u pogrešan energetski razred. Nadalje zanemarivanje tih gubitaka može dovesti do poddimezioniranja sustava za grijanje i hlađenje, a samo smanjenje površinske temperature na unutrašnjosti zgrade, zbog prisustva toplinskog mosta, može dovesti do razvoja gljivica i plijesni na unutarnjoj površini.

Cilj je ovog rada određivanje utjecaja toplinskog mosta preko točkastog koeficijenta prolaska topline  $\chi$  [W/K] na mjestu prodora čeličnih šipki kroz sloj toplinske izolacije.

## 2. Formule korištene za kvantificiranje utjecaja toplinskih mostova

Određivanje toplinskih gubitaka zbog prisustva toplinskih mostova računa se preko izraza (1) [7]:

$$H_d = \sum_i A_i \cdot U_i + \sum_k l_k \cdot \Psi_k + \sum_j \chi_j \quad (1)$$

gdje je  $H_d$  [W/K] koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu,  $A_i$  [m<sup>2</sup>] je površina elementa  $i$  na ovojnici grijanog dijela zgrade,  $U_i$  [W/m<sup>2</sup>K] je koeficijent prolaza topline elementa  $i$  na ovojnici grijanog dijela zgrade,  $l_k$  [m] je duljina linijskog toplinskog mosta  $k$ ,  $\Psi_k$  [W/mK] je duljinski koeficijent prolaska topline linijskog toplinskog mosta  $k$ , a  $\chi_j$  je točkasti koeficijent prolaska topline točkastog toplinskog mosta  $j$ . Koeficijent prolaza topline  $U$  se određuje preko norme HRN EN ISO 6946 [8].

U slučaju da se točkasti toplinski mostovi pojavljuju na spojevima linijskih toplinskih mostova, u izrazu (1) se može zanemariti dio koji sadrži koeficijente  $\chi$  [7]. Budući da se u ovom radu isključivo promatra utjecaj točkastih toplinskih mostova uzrokovanih čeličnim pričvrscicama koje nose fasadne elemente, u izrazu (1) se zanemaruju članovi koji se

odnose na linijske toplinske mostove. Točkasti koeficijent prolaska topline  $\chi$  računa se u skladu s normom HRN EN 10211 preko izraza (2):

$$X = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot A_i \quad (2)$$

gdje je  $L_{3D}$  [W/K] koeficijent toplinske veze dobiven iz 3D proračuna komponenti koje razdvajaju dva promatrana okoliša.

Ako se točkasti toplinski mostovi ponavljaju na vanjskoj ovojnici grijanog dijela zgrade, njihov utjecaj na povećanje koeficijenta prolaska topline može biti značajan. Ako se sa  $n$  označi broj pričvrsnica po  $m^2$  površine elementa, tada se povećanje koeficijenta prolaska topline jednog elementa  $\Delta U$  [W/m<sup>2</sup>K] računa preko izraza (3):

$$\Delta U = n \cdot X, \quad (3)$$

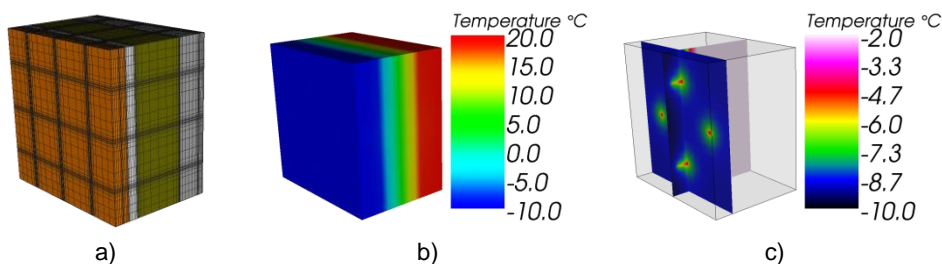
a ukupan koeficijent prolaska topline elementa s utjecajima toplinskih mostova jednak je:

$$U = U_0 + \Delta U \quad (4)$$

gdje je  $U_0$  [W/m<sup>2</sup>K] koeficijent prolaska topline elementa bez toplinskih mostova.

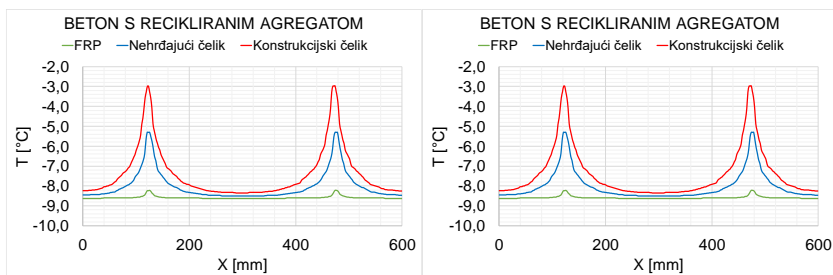
### 3. Numerička analiza točkastih toplinskih mostova

Tipičan element predgotovljenog ventiliranog betonskog fasadnog panela analiziranog u ovom radu iznosi približno 1200×1200 mm, te se u njemu nalazi 9 čeličnih pričvrsnica. Za izradu numeričkog modela u obzir je uzeta samo četvrtina panela dimenzija 600×600 mm (Slika 2 – lijevo) sa 4 čelične pričvrsnice. Slika 2 – desno prikazuje raspodjelu temperature u elementu.



**Slika 2.** Model korišten u računalnom programu AnTherm (a) i raspodjela temperature u elementu (b) i raspodjela temperature na pričvrstnicama (c)

Pomoću računalnog programa AnTherm [9] pri stacionarnim uvjetima prolaska topline određen je točkasti koeficijent toplinske veze  $L_{3D}$  za beton s recikliranim agregatom (BRA) i za armirani beton (AB), te su se kombinirali različiti materijali pričvrsnica fasadnog elementa – konstrukcijski čelik, nehrđajući čelik i polimer ojačan vlaknima (FRP). Rubni uvjeti su uzeti kao temperatura unutarnjeg i vanjskog okoliša ( $T_i = 20$  °C i  $T_e = -10$  °C), a koeficijent toplinske provodljivosti zraka ventiliranog sloja određen je preko norme HRN EN ISO 6946 [8] i iznosi 0.226 W/mK. Povećanje toplinske provodljivosti zraka uzrokovano je strujanjem fluida po površinama koje graniče s ventiliranim slojem.

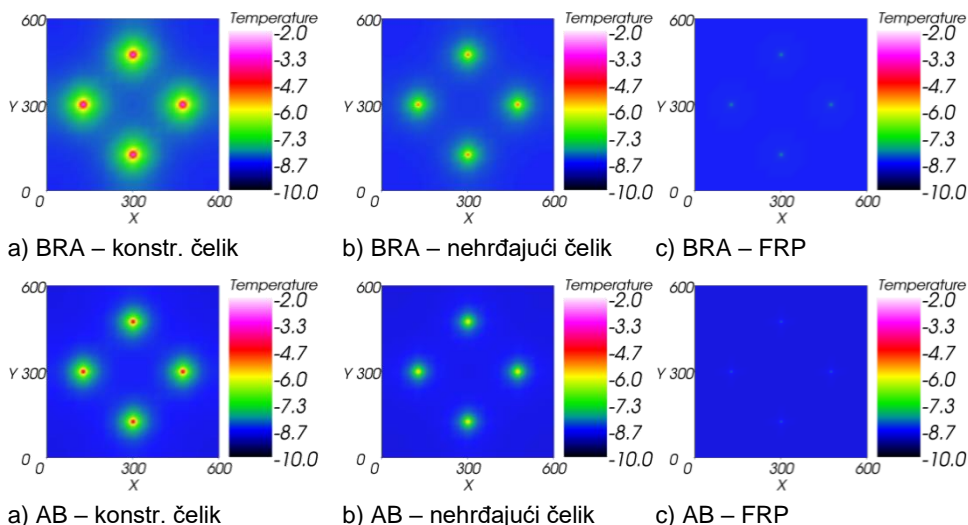


Slika 3. Raspodjela temperature u području toplinskog mosta na mjestu spoja TI s ventiliranim slojem

Tablica 4. Rezultati numeričke analize

Beton	Pričvrsnice	$L_{3D}$	A	$U_0$	X	pr./m <sup>2</sup>	$\Delta U$	U
BRA	Konstr. čelik	0.023	0.09	0.159	0.009	9	0.077	0.236
	Nehrđajući čelik	0.017	0.09	0.159	0.003	9	0.026	0.185
	FRP	0.017	0.09	0.159	0.000	9	-0.002	0.157
AB	Konstr. čelik	0.025	0.09	0.163	0.010	9	0.092	0.255
	Nehrđajući čelik	0.018	0.09	0.163	0.003	9	0.029	0.192
	FRP	0.014	0.09	0.163	0.000	9	-0.002	0.160

Koeficijent prolaska topline  $\chi$  određuje se preko izraza (2), povećanje koeficijenta prolaska topline  $\Delta U$  preko izraza (3) te ukupan koeficijent prolaska topline s utjecajima točkastih toplinskih mostova  $U$  preko izraza (4). Tablica 4 prikazuje rezultate dobivene numeričkom analizom.



Slika 4. Raspodjela temperature na vanjskoj površini toplinske izolacije

U slučaju AB  $U_0$  je veći nego u slučaju BRA. Zbog toga se kod AB dobivaju veći transmisijski gubici zbog točkastih toplinskih mostova –  $\Delta U$ , iako su koeficijenti  $X$  za AB i BRA skoro jednaki (Tablica 4). Sa Slika 3 može se vidjeti da je utjecaj toplinskog mosta manji ako se za pričvrsnice koristi materijal s manjim koeficijentom toplinske provodljivosti, a ujedno je i manja razlika temperature na mjestu toplinskog mosta u odnosu na neporemećeno stanje. Za slučaj s AB, utjecaj toplinskih mostova je manji zbog manje razlike koeficijenta toplinske provodljivosti materijala pričvrsnica i AB (Slika 4), ali je površinska temperatura na pričvrsnici veća u slučaju korištenja AB nego u slučaju BRA (Slika 3). Za sve kombinacije korištenih materijala nema rizika od nastanka gljivica jer je unutarnja temperatura na mjestu toplinskog mosta skoro jednaka temperaturi neporemećenog područja.

#### 4. Zaključak

U ovom su se radu toplinski mostovi analizirali pri stacionarnim uvjetima prolaska topline i velikim razlikama unutarnje i vanjske temperature prema normi HRN EN ISO 10211.

Jedan od razloga zanemarivanja točkastih toplinskih mostova u fazi projektiranja je potreba korištenja računalnih programa specijaliziranih za proračun toplinskih mostova – proračun točkastih toplinskih mostova je uvijek trodimenzionalan.

Korištenje prikladnih materijala u cilju smanjenja toplinskih gubitaka je ključno. Odluka korištenja nehrđajućeg čelika umjesto konstrukcijskog čelika dovela je do smanjenja transmisijskih toplinskih gubitaka za oko 20 %, dok je korištenje materijala male toplinske provodljivosti (FRP-a) rezultiralo smanjenjem toplinskih gubitaka od otprilike 40 %.

#### Literatura

- [1] Eurostat, TSDPC320| Final energy consumption by sector [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.econdb.com/dataset/TSDPC320/>. [Pristupljeno: 26-lip-2018]
- [2] HK Standard System. [Na internetu]. Dostupno na: <https://hkties.com/products/hk-standard-system/>. [Pristupljeno: 11-srp-2018]
- [3] Pečur, I. B., Štirmer, N., Milovanović, B., Carević, I.: Energy Efficiency Aspects of Recycled Aggregate, br. 1, str. 1–8, 2014.
- [4] Croatian Standard Institute, HRN EN ISO 10211 - Toplinski mostovi u zgradarstvu - Toplinski tokovi i površinske temperature - Detaljni proračuni. Zagreb, 2017.
- [5] Gomes, A. P., De Souza, H. A., Tribess, A.: Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil, Applied Thermal Engineering, 52, br. 1, str. 84–89, 2013.
- [6] Qasass, R., Gorgolewski, M., Ge, H.: Timber framing factors in Toronto residential house construction, Architectural Science Review, 57, br. 3, str. 159–168, 2014.
- [7] Croatian Standard Institute, HRN EN ISO 14683 - Toplinski mostovi u zgradarstvu - Linearni koeficijent prolaska topline - Pojednostavnjene metode i zadane utvrđene vrijednosti
- [8] Croatian Standard Institute, HRN EN ISO 6946 - Građevni djelovi i građevni elementi - Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline - Metode proračuna. Zagreb, 2017.
- [9] AnTherm. [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.antherm.at/antherm/EN/Waermebruecken.htm>. [Pristupljeno: 16-srp-2018]

## Analiza pouzdanosti armiranobetonskog okvira metodom konačnih elemenata (MKE)

Marin Grubišić<sup>1</sup>, Jelena Ivošević<sup>1</sup>

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, Republika Hrvatska, [marin.grubisic@gfos.hr](mailto:marin.grubisic@gfos.hr), [jelenaivosevic9@gmail.com](mailto:jelenaivosevic9@gmail.com)

### Sažetak

Cilj ovog rada je prezentirati mogućnosti nelinearnog modeliranja armiranobetonskog (AB) ravninskog okvira i njegove analize pouzdanosti metodom konačnih elemenata (MKE). Studija se sastoji od eksperimentalnog i numeričkog modela [1]. Ukratko je prikazan primjer numeričke kalibracije eksperimenta, nakon čega je numerički model nadograđen u svrhu analize pouzdanosti. Kalibracije i analize pouzdanosti modela provedene su računalnim programom *OpenSees* [2].

Na temelju monotonog odziva postupnim guranjem okvira, dopunjen je numerički model s parametrima slučajnih varijabli, u cilju analiziranja pouzdanosti ograničavanjem horizontalnog međukatnog pomaka. Korištene su metode analize pouzdanosti FOSM, FORM, SORM i Monte Carlo simulacije, nakon čega su prezentirani osnovni rezultati i izvedeni zaključci.

*Ključne riječi:* armiranobetonski okvir, analiza pouzdanosti, FOSM, FORM, SORM, Monte Carlo, *OpenSees*

## Reliability analysis of reinforced concrete frame by Finite Element Method (FEM)

### Abstract

The aim of this paper is to present the possibilities of nonlinear modelling of reinforced concrete (RC) plane frame and its reliability analysis by Finite Element Method (FEM). The study consists of an experimental and numerical model [1]. An example of numerical experiment calibration is shown briefly, after which the numerical model is upgraded for reliability analysis purposes. Calibration and model reliability analysis were performed by the *OpenSees* computer program [2].

Based on the pushover response, a numerical model with random variable parameters has been updated to analyse the reliability by limiting the lateral displacement. FOSM, FORM, SORM and Monte Carlo simulation methods were used, after which basic results and conclusions were presented.

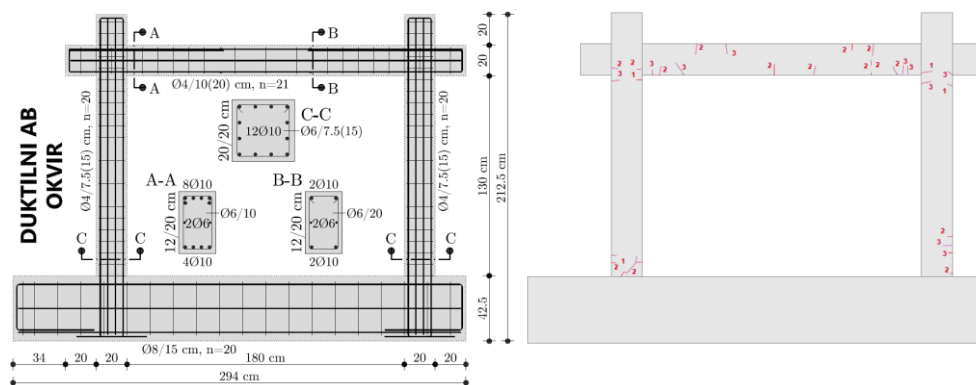
*Keywords:* reinforced concrete frame, reliability Analysis, FOSM, FORM, SORM, Monte Carlo, *OpenSees*

## 1. Uvod

Analiza pouzdanosti konstrukcija podrazumijeva procjenu vjerojatnosti graničnog stanja konstrukcije uslijed nepovoljnih djelovanja za predviđeno razdoblje uporabe. Obično u seizmičkim analizama rizika konstrukcija, vjerojatnost prekoračenja graničnog stanja (dobivene iz analize pouzdanosti) integrirana je sa seizmičkim rizikom lokaliteta. Povezani termin koji se koristi u vezi s analizom seizmičke pouzdanosti i rizika konstrukcija je analiza oštettljivosti (engl. *Fragility Analysis*). Najvažniji aspekt u analizi pouzdanosti je razmatranje nesigurnosti (engl. *Uncertainties*) koje čine određenu konstrukciju ranjivom i osjetljivom na otkazivanje za predefinjirano granično stanje [3].

### 1.1. Eksperimentalni model

Eksperimentalno ispitivanje je provedeno u sklopu znanstvenog projekta „Seizmički proračun okvira s ispunom“ (MZOS, 149–1492966–15), pod mentorstvom prof. dr. sc. Vladimira Sigmunda. Geometrija, poprečni presjeci i količine armature modela izvedenog u mjerilu 1:2.5 prikazane su na Slici 1. Proračun zamišljene zgrade, iz koje je izdvojen prikazani središnji okvir prizemlja u mjerilu, proveden je u skladu s normama [4, 5], za srednji razred duktilnosti, DCM, betona klase C30/37. Armirani su rebrastom armaturom B500B. Stvarna mehanička svojstva, modul elastičnosti, granica tečenja i granica loma, utvrđena su u skladu s važećim normama. Tlačna čvrstoća betonske kocke iznosi 50 MPa, dok su vlačna čvrstoća pri tečenju i slomu te modul elastičnosti armature 550, 650 i 210000 MPa.



**Slika 1.** Shematski prikaz geometrije, presjeka i količine armature ravninskog modela (lijevo) te razvoj pukotina tijekom ispitivanja (desno)

Model je ispitivan ciklički, uz konstantnu ukupnu vertikalnu silu u stupovima iznosa 730 kN, odnosno 365 kN po stupu te kontrolom horizontalne sile, odnosno pomaka na razini grede do iznosa pomaka od 1.0 % međukatnog pomaka (IDR), odnosno 14 mm. Na Slici 2 je dana histerezna petlja kao osnovni prikaz odziva AB okvira za navedene dimenzije i opterećenja.



## 2.1. Definiranje analiza pouzdanosti

Kalibriran numerički model ranije prikazan, nadograđen je s definiranim slučajnim varijablama normalnih (N) i log-normalnih (LN) razdioba, te definiranim parametrima koji su povezani sa slučajnim varijablama. Potrebno je naglasiti da je numerički model prilagođen tako da su mu elementi, odnosno presjeci definirani kao vlaknasti (s konstitucijskim materijalima vidljivim na Slici 3), dakle nisu definirani s oprugama, čije su karakteristike također dobivene iz analize presjeka definiranih kao vlaknasti. Razlog ovomu je lakše razumijevanje slučajnih varijabli i njenih pripadajućih parametara. Srednje vrijednosti svih slučajnih varijabli dobiveni su iz provedenih eksperimenata i kalibracije, dok su im pridruženi koeficijenti varijacije (COV) dobiveni dijelom iz eksperimentalnih ispitivanja materijala i dijelom iz dostupne relevantne literature (Tablica 1).

U cilju prikaza mogućnosti analiza pouzdanosti metodom konačnih elemenata (MKE) uvedena je i korelacija između pojedinih parametara, odnosno slučajnih varijabli. Tako je primjerice uvedena korelacija između čvrstoća na granici tečenja i modula elastičnosti armaturnog čelika u iznosu od 60 % što je usvojeno iz dostupne literature [8, 9]. Nadalje uvedena je potpuna korelacija između vršnih tlačnih čvrstoća betona za ovijeni i neovijeni dio betonskog presjeka isto kao i za pripadajuće deformacije, i to u iznosu od 100 %. Tako se važnosti pojedinih slučajnih varijabli za jednadžbu graničnog stanja može rangirati prema dva parametra,  $\alpha$  i  $\gamma$  (engl. *Importance vectors*). Tako parametar važnosti  $\alpha$  ne uzima u obzir korelaciju između slučajnih varijabli, dok parametar važnosti  $\gamma$  uzima u obzir definiranu korelaciju.

**Tablica 1.** Prikaz slučajnih varijabli sa svojim srednjim vrijednostima, standardnim devijacijama i koeficijentima varijacije

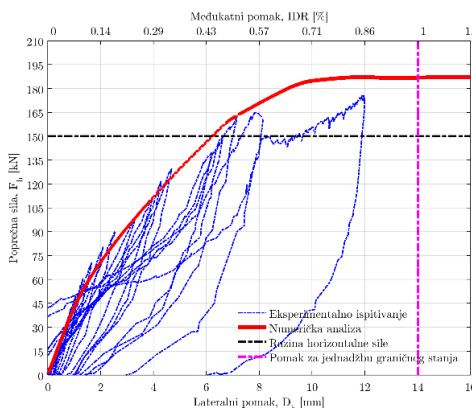
SV	Param.	$\mu_i$	$\sigma_i$	COV	Mj. jed.	Distr.	Reference za COV
101	$f_y$	550	44.00	0.08	[MPa]	LN	Eksp. + [10–12]
102	$E_s$	210000	12600	0.06	[MPa]	LN	Eksp.+ [8–10]
103	$f_{c1C}$	–65	–9.75	0.15	[MPa]	N	Eksp.+ [10, 13–16]
104	$\varepsilon_{c1C}$	–0.005	–0.0008	0.15	[—]	N	Eksp.+ [10, 13, 17]
105	$f_{c1U}$	–50	–7.50	0.15	[MPa]	N	Eksp.+ [10, 13, 15, 16]
106	$\varepsilon_{c1U}$	–0.002	–0.0003	0.15	[—]	N	Eksp.+ [10, 13, 17]
107	$F_v$	365	36.50	0.10	[kN]	N	Eksp.+ [12, 14]
108	$L_s$	1400	—	0.01	[mm]	N	[10, 14, 18]
109	$C_{cover}$	15	—	0.25	[mm]	N	[10, 14, 18]
110	$H_s$	200	—	0.05	[mm]	N	[10, 14, 18]
111	$H_g$	200	—	0.05	[mm]	N	[10, 14, 18]

U Tablici 1 simboli parametara označavaju sljedeće: granica tečenja armaturnog čelika ( $f_y$ ), modul elastičnosti armaturnog čelika ( $E_s$ ), tlačna čvrstoća ovijene betonske jezgre s pripadajućom deformacijom ( $f_{c1C}$ ,  $\varepsilon_{c1C}$ ), tlačna čvrstoća neovijenog betona s pripadajućom deformacijom ( $f_{c1U}$ ,  $\varepsilon_{c1U}$ ), vertikalna sila u jednom stupu ( $F_v$ ), visina stupa ( $L_s$ ), debljina zaštitnog sloja betona stupova i grede ( $C_{cover}$ ), visina poprečnog presjeka stupova i grede ( $H_s$ ,  $H_g$ ). Pristup analize pouzdanosti metodom konačnih elemenata ima prednost ponajprije u mogućnosti reduciranja nesigurnosti koje su inače prisutne kod analitičkog definiranja jednadžbe graničnog stanja, čiji se oblik znatno komplicira uzevši u obzir geometrijsku i



materijalnu nelinearnost te statičku neodređenost modela. Za procjenu pouzdanosti horizontalne nosivosti, u domeni potresnog inženjerstva, dovoljno je definirati jednadžbu graničnog stanja ograničavanjem primjerice međukatnog pomaka [19, 20]. Slika 4 prikazuje ovojnici nosivosti vlaknastog numeričkog modela u odnosu na ciklički odgovor eksperimenta. Na istoj slici odabrana je granica međukatnog pomaka na temelju koje je definirana jednadžba graničnog stanja. Također je usvojena konstantna vrijednost opterećenja horizontalnom silom u iznosu od 150 kN, što je za ovaj deterministički model iznos nosivosti pri kojoj se prekoračuje vrijednost čvrstoće na granici tečenja armaturnog čelika, nakon čega okvir progresivno gubi kapacitet horizontalne nosivosti. Dakle granično stanje pomaka je ograničeno na 14 mm, odnosno na 1.0 % međukatnog pomaka okvira, kako je definirano jednadžbom graničnog stanja (1). Za sve analize pouzdanosti, FOSM (engl. *First Order Second Moment*), FORM (engl. *First Order Reliability Method*), SORM (engl. *Second Order Reliability Method*) i Monte Carlo simulacije (engl. *Conventional brute-force Monte Carlo*, MCS), korištena je metoda postupnog guranja kontrolom horizontalnog opterećenja od 20 koraka do dosezanja konačnih 150 kN (zahtjev). Primarna jednadžba graničnog stanja tako glasi:

$$g x = 14.0 - u_3 \quad \text{ili} \quad g x = 0.01 \cdot L_{stup} - u_3 \quad (1)$$



**Slika 4.** Usporedba histereze (lijevo) i ovojnice (desno) za modificirani model s distribuiranim plastičnostima

Cilj analiza pouzdanosti (FOSM, FORM, SORM, MCS) je provjeriti njihovu usporedivost i primjenjivost tako da za Monte Carlo simulacije očekujemo vjerojatnost prekoračenja  $p_f$  za razuman broj simulacija ( $N_{MCS} \approx 10^5$ ) blizak FORM i SORM analizama. Za Monte Carlo simulacije kreiran je algoritam posebno za metodu postupnog guranja kontrolom sile, te posebno za kontrolu pomaka, čime možemo kreirati jednadžbu graničnog stanja ograničavajući određeni pomak ili progib (*kontrola sile*) ili ograničavajući neku od unutarnjih sila elemenata ili naprezanja (*kontrola pomaka*).

### 3. Rezultati analiza pouzdanosti

Tablice 2 i 3 prikazuju rang listu slučajnih varijabli (SV) i njihovih parametara prema važnosti, kao rezultat FORM analize, prema  $\alpha_i$  i  $\gamma_i$  vektoru, time je i vidljiva razlika u redosljednosti važnosti parametara sa i bez definirane korelacije. U tablicama 2 i 3 vidljiva je razlika u redosljednosti važnosti parametara sa i bez definirane korelacije. Vrijednosti  $X_i^*$  prikazuju vrijednosti pojedinih parametara kako bi za isto horizontalno opterećenje od 150 kN dosegli točno željeni ciljani projektni pomak (engl. *Design point*). Vrijednosti  $X_i^*$  mogu služiti i za optimizaciju sustava tako da se iterativnim postupkom prati razlika srednjih vrijednosti  $\mu_i$  u odnosu na projektne (ciljane) vrijednosti  $X_i^*$  i racionaliziraju određene dimenzije presjeka, rasponi ili mehanička svojstva materijala.

**Tablica 2.** Rang lista slučajnih varijabli (SV) i parametara prema važnosti, kao rezultat FORM analize, prema  $\gamma_i$  vektoru, odnosno **uzimajući** u obzir korelaciju između definiranih slučajnih varijabli za jednadžbu graničnog stanja  $g \ x = 14.0 - u_3$

SV <sub>i</sub>	Param.	Mj. jed.	$\mu_i$	$X_i^*$	$\alpha_i$	$\gamma_i$
110	$H_s$	[mm]	2.000E+02	1.859E+02	-0.41402	-0.47684
101	$f_y$	[MPa]	5.500E+02	5.093E+02	-0.42490	-0.46979
103	$f_{c1C}$	[MPa]	-6.500E+01	-4.111E+01	-0.68746	0.44947
109	$C_{cover}$	[mm]	1.500E+01	1.738E+01	0.33134	0.38161
104	$f_{c1U}$	[MPa]	-5.000E+01	-3.165E+01	-0.04235	0.34575
111	$H_g$	[mm]	2.000E+02	1.538E+02	-0.22961	-0.26444
108	$L_s$	[mm]	1.400E+03	1.405E+03	0.09217	0.10615
107	$F_v$	[kN]	-3.650E+05	-3.421E+05	-0.03832	0.04414
102	$E_s$	[MPa]	2.100E+05	1.993E+05	-0.02263	-0.03260
105	$\varepsilon_{c1C}$	[—]	-5.000E-03	-5.855E-03	-0.02574	0.02124
106	$\varepsilon_{c1U}$	[—]	-2.000E-03	-2.340E-03	-0.00104	0.00850

**Tablica 3.** Rang lista slučajnih varijabli (SV) i parametara prema važnosti, kao rezultat FORM analize, prema  $\alpha_i$  vektoru, odnosno **ne uzimajući** u obzir korelaciju između definiranih slučajnih varijabli za jednadžbu graničnog stanja  $g \ x = 14.0 - u_3$

SV <sub>i</sub>	Param.	Mj. jed.	$\mu_i$	$X_i^*$	$\alpha_i$	$\gamma_i$
103	$f_{c1C}$	[MPa]	-6.500E+01	-4.111E+01	-6.875E-01	4.495E-01
101	$f_y$	[MPa]	5.500E+02	5.093E+02	-4.249E-01	-4.698E-01
110	$H_s$	[mm]	2.000E+02	1.859E+02	-4.140E-01	-4.768E-01
109	$C_{cover}$	[mm]	1.500E+01	1.738E+01	3.313E-01	3.816E-01
111	$H_g$	[mm]	2.000E+02	1.538E+02	-2.296E-01	-2.644E-01
108	$L_s$	[mm]	1.400E+03	1.405E+03	9.217E-02	1.062E-01
104	$f_{c1U}$	[MPa]	-5.000E+01	-3.165E+01	-4.235E-02	3.458E-01
107	$F_v$	[kN]	-3.650E+05	-3.421E+05	-3.832E-02	4.414E-02
105	$\varepsilon_{c1C}$	[—]	-5.000E-03	-5.855E-03	-2.574E-02	2.124E-02
102	$E_s$	[MPa]	2.100E+05	1.993E+05	-2.263E-02	-3.260E-02
106	$\varepsilon_{c1U}$	[—]	-2.000E-03	-2.340E-03	-1.040E-03	8.500E-03

Vidljivo je da korelacija ne utječe samo na parametre na koje se odnosi, već i na sve parametre s kojima su u interakciji unutar numeričkog modela. Na razini poprečnog presjeka je vidljivo da su parametri ovijenog i neovijenog betona u ovom slučaju najosjetljiviji na korelaciju parametara armaturnog čelika gdje parametri čvrstoća ovijenog i neovijenog betona,  $f_{c1C}$  i  $f_{c1U}$ , dobivaju na važnosti. Budući da karakteristike armaturnog čelika direktno utječu na ponašanje ovijenog betona, parametar  $f_{c1C}$  postaje najvažnijim parametrom za granično stanje  $g \cdot x = 14.0 - u_3$ , dok parametar  $f_{c1U}$  postaje manje značajan.

FORM analiza je zaključena s ukupno 29 iteracija pomoću HLRF postupka, evaluirajući tako ukupno 60 aproksimacija  $g$ -funkcija. Također je provedena i SORM analiza na dva načina: usvajanjem prve glavne krivulje zakrivljenosti, SORM-FP (engl. *First Principal [Curvature]*), te kombinacijom 10 krivulja zakrivljenosti za bolju aproksimaciju indeksa pouzdanosti SORM-CF (engl. *Curvature Fitting*). Razlika indeksa pouzdanosti  $\beta_{FORM}$  i  $\beta_{SORM-CF}$  je svega 0.139 %. Tako je vjerojatnost prekoračenja graničnog stanja  $p_{f,FORM} = 0.100$  %, odnosno  $p_{f,SORM-CF} = 0.099$  %. Nadalje smo dodali za usporedbu dodatne dvije jednadžbe graničnog stanja (granično stanje pomaka od 10 mm i 6 mm) kako bi usporedili trend smanjenja indeksa pouzdanosti u odnosu na smanjenje definiranog graničnog stanja pomaka. U Tablici 4 uspoređeni su indeksi pouzdanosti FORM, FOSM, SORM-FP i SORM-CF analiza za granična stanja od 14 mm, 10 mm i 6 mm međukatnog pomaka.

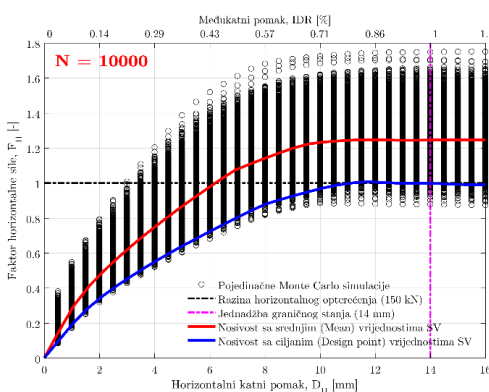
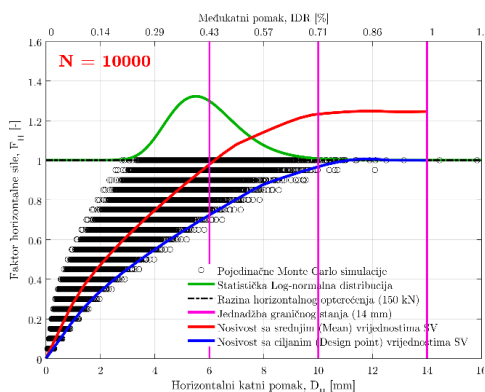
**Tablica 4.** Usporedba indeksa pouzdanosti FORM, FOSM, SORM-FP i SORM-CF analizom za tri jednadžbe graničnih stanja

Analiza	Indeks pouzdanosti, $\beta$	GS #1	GS #2	GS #3
		$D_H = 14$ mm	$D_H = 10$ mm	$D_H = 6$ mm
FOSM	$\beta_{FOSM}$	4.403	2.296	0.187
FORM	$\beta_{FORM}$	3.089	2.358	0.306
SORM-FP	$\beta_{SORM-FP}$	3.089	2.358	0.306
SORM-CF	$\beta_{FOSM-CF}$	3.093	2.364	0.309

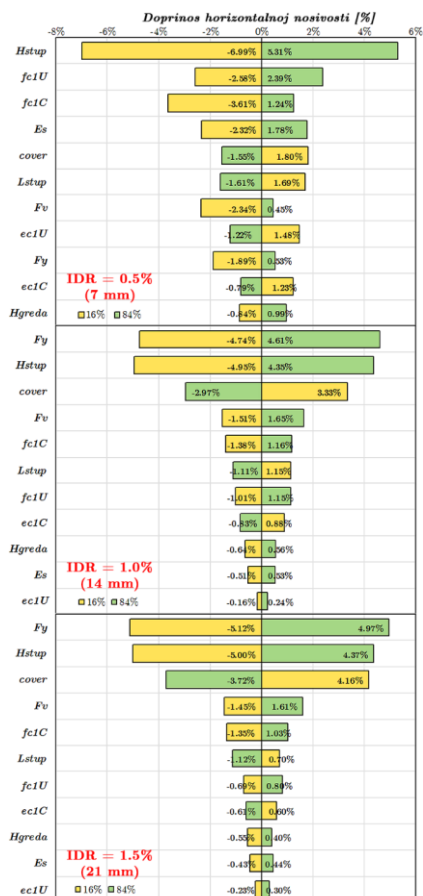
U nastavku su prikazani rezultati Monte Carlo analiza (*Conventional brute-force Monte Carlo*) za  $N_{MCS} = 10^4$  simulacija, provodeći nelinearne analize kontrolom horizontalne sile (engl. *Load Control, LC*) od ukupno 150 kN u 20 koraka po 7.5 kN (Slika 5). Uočljivo je koliko se razlikuju crvena i plava krivulja nosivosti. Crvena krivulja nosivosti okvira je proizašla koristeći srednje vrijednosti svih parametara, dok je plava krivulja nosivosti temeljena na vrijednostima pojedinih parametara dobivenih FORM analizom s obzirom na zadanu jednadžbu graničnog stanja. Također s obzirom na kompleksnost sustava, iz Tablice 5 je vidljivo da se za dovoljno točan izračun vjerojatnosti prekoračenja graničnog stanja preporučuje 100000 ( $10^5$ ) simulacija.

**Tablica 5.** Usporedba utjecaja broja Monte Carlo simulacija (MCS–LC) s FORM analizom na vjerojatnost prekoračenja pojedinog graničnog stanja

Broj MCS, $N_{MCS}$	Granično stanje #1, $D_H = 14$ mm,	Granično stanje #2, $D_H = 10$ mm,	Granično stanje #3, $D_H = 6$ mm,	Vrijeme MCS (h:m:s)
	$p_{f,MCS}$	$p_{f,MCS}$	$p_{f,MCS}$	
50	0.0000	0.0000	0.3200	0:00:01
100	0.0000	0.0000	0.3400	0:00:02
250	0.0000	0.0040	0.4280	0:00:03
500	0.0020	0.0050	0.3620	0:00:03
1000 ( $10^3$ )	0.0010	0.0060	0.4110	0:00:05
2500	0.0020	0.0060	0.3840	0:00:10
5000	0.0016	0.0074	0.3878	0:00:20
10000 ( $10^4$ )	0.0008	0.0080	0.3846	0:00:37
100000 ( $10^5$ )	0.0010	0.0085	0.3823	0:05:53
500000	0.0010	0.0090	0.3780	0:26:20
$p_{f,FORM}$	0.0010	0.0091	0.3798	0:00:03



**Slika 5.** Ilustracija MCS za  $N_{MCS} = 10\ 000$  simulacija, MCS–LC (lijevo) i MCS–DC (desno)



Slika 6. Tornado dijagrami za 3 jednadžbe graničnih stanja

Jednako je prikazan utjecaj Monte Carlo simulacijama doprinos broja simulacija  $N_{MCS}$  u značajno plastičnom području odgovora numeričkog modela. U ovu svrhu provedena je Monte Carlo simulacija kontrolom pomaka (engl. *Displacement Control, DC*) kako bi odziv modela mogao konvergirati u svom nelinearnom području. Kontrola pomaka se provela do iznosa pomaka od  $IDR = 1.12\%$ , odnosno do pomaka od 16 mm u 32 koraka, što čini jedan korak od 0.5 mm (Slika 5). Kontrolom pomaka konstruiran je i tzv. tornado dijagram koji je postao uobičajen u analizama pouzdanosti područja potresnog inženjerstva [11, 21–23]. Svaki parametar slučajne varijable se pojedinačno usvaja sa svojim 16 % i 84 % fraktilom vrijednosti te se provodi statička (ili moguća dinamička) analiza te prati razlika u odzivu modela. U ovom je slučaju to horizontalna nosivost prikazana u postotku razlike odziva s obzirom na odziv srednjih vrijednosti svih parametara. Na Slici 6 može se vidjeti različita važnost parametara za tri granična stanja horizontalnog pomaka. Posebno je vidljivo koji parametri svojom većom vrijednošću povećavaju, a koji smanjuju vrijednosti horizontalne nosivosti modela.

Budući da je  $10^5$  simulacija moguće provesti u gotovo 5 minuta za ovaj primjer (i konfiguraciju danas prosječnog prijenosnog računala), nema razloga žrtvovati broj simulacija i procjenu točnosti same analize. U ovom i kompleksnijim slučajevima bi se dakako pokazala racionalnija metoda *Latin Hypercube Sampling* (LHS) koju svakako treba razmotriti ovisno o mogućnostima programskog jezika, primjerice Python ili MATLAB.

#### 4. Zaključak

Prikazana je mogućnost primjene analize pouzdanosti na potpuno nelinearnom numeričkom modelu, primjenom MKE te usporedivost FOSM, FORM, SORM–FP, SORM–CF metoda sa MCS. Ovaj pristup je posebno pogodan zbog moguće implementacije geometrijske i materijalne nelinearnosti, provedbu statičke i dinamičke analize, jednostavno pokrivanje ovisnih i epistemičkih nesigurnosti (engl. *Aleatory & Epistemic Uncertainty*) u pogledu materijalnih i geometrijskih karakteristika, te potresnih zapisa u slučaju dinamičkih analiza. Također se mogu optimizirati značajni parametri na temelju ciljanog pomaka (engl. *Design Point*), može se definirati više jednadžbi graničnih stanja tijekom iste analize, koje se mogu temeljiti na lokalnim ili globalnim odzivima sustava, prateći unutarnje sile i pomake, odnosno deformacije. FOSM analiza procjenjuje indeks pouzdanosti  $\beta_{FOSM}$  veću za do 40 % od ostalih analiza koje su međusobno usporedive. FORM analiza nam pruža uvid u važnost pojedinih parametara putem vektora važnosti bez utjecaja korelacije  $\alpha_i$  i s utjecajem korelacije  $\gamma_i$ . SORM analiza u odnosu na FORM analizu daje manju razliku u indeksu pouzdanosti pojedinih graničnih stanja, i to otprilike 0.14 %, što je za ovaj primjer zanemarivo. Monte Carlo simulacije daju vrlo točne vrijednosti vjerojatnosti prekoračenja pojedinih graničnih stanja  $p_f$  za broj simulacija veći od  $N_{MCS} \geq 10^5$ . Značajni parametri za glavnu jednadžbu graničnog stanja koja iznosi  $g \ x = 1.0 \% IDR - u_3$ , temeljeni na vektoru važnosti su:  $H_s$  ukupna visina poprečnog presjeka stupa,  $f_y$  vlačna čvrstoća armaturnog čelika na granici tečenja,  $f_{c1C}$  vršna tlačna čvrstoća ovijenog dijela (jezgre) betona,  $c_{cover}$  zaštitni sloj betona koji direktno utječe na statičku visinu presjeka,  $f_{c1C}$  vršna tlačna čvrstoća neovijenog dijela (zaštitnog sloja) betona, te  $H_g$  reda ukupna visina poprečnog presjeka grede.

#### Literatura

- [1] Grubišić, M.: Modeli ocjene ojačanja armiranobetonskih okvira dodavanjem ispuna pri potresnom djelovanju, doktorska disertacija, Nosive konstrukcije, Sveučilište u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2016, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:253853>.
- [2] McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., Mazzoni, S., Jeremić, B.: OpenSees – Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA. <http://opensees.berkeley.edu>, Tech. Rep., 2000.
- [3] Datta, T. K.: Seismic Analysis of Structures, J. W. Sons, Ed. John Wiley & Sons, 2011., <https://doi.org/10.1002/9780470824634>.
- [4] EN1992–1:2004, Eurocode 2 – Design of Concrete Structures: General Rules and Rules for Buildings, C. European Committee for Standardization, Ed. European Committee for Standardization, CEN, 2004, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/>

- [5] EN1998–1:2004, Eurocode 8 – Design of Structures for Earthquake Resistance — Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, C. European Committee for Standardization, Ed. European Committee for Standardization, CEN, 2004, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/>
- [6] Takeda, T., Sozen, M. A., Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulate earthquakes, ASCE, Journal of the Structural Division, vol. 96(12), pp. 2557–2573, 1970., <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0017038>
- [7] Paulay, T., Priestley, M. J. N.: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, Wiley, Ed. Wiley–Interscience; 1st edition (March 1992), 1992.
- [8] Hess, P. E., Bruchman, D., Assakkaf, I. A., Ayyub, B. M.: Uncertainties in material strength, geometric, and load variables, Naval Engineers Journal, ASNE, 2002., <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2002.tb00128.x>
- [9] Buonopane, S. G.: Strength and reliability of steel frames with random properties, Journal of Structural Engineering, vol. 134, no. 2, pp. 337–344, 2008., [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:2\(337\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:2(337))
- [10] JCSS, Probabilistic Model Code Part III. Joint Committee On Structural Safety (JCSS), Denmark, Technical University of Denmark, 2000., <http://www.jcss.byg.dtu.dk>
- [11] Celarec, D., Ricci, P., Dolšek, M.: The sensitivity of seismic response parameters to the uncertain modelling variables of masonry–infilled reinforced concrete frames, Engineering Structures, vol. 35, pp. 165–177, 2012., <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.007>
- [12] Ellingwood, B., Galambos, T., MacGregor, J., Cornell, C.: Development of a Probability–Based Load Criterion For American National Standard A58, Washington, DC, National Bureau of Standards, Tech. Rep., 1980., <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nbsspecialpublication577.pdf>
- [13] El-Reedy, M. A.: Reinforced Concrete Structural Reliability. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012., <http://www.worldcat.org/title/reinforced-concrete-structural-reliability/oclc/929419967>
- [14] Robertson, L. E., Naka, T.: Tall Building Criteria and Loading, E. H. Gaylord and R. J. Mainstone, Eds. American Society of Civil Engineers, ASCE, 1980., <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0030268>
- [15] Mishra, D. K.: Compressive Strength Variation of Concrete in a Large Inclined RC Beam by Non-Destructive Testing, Associated Cement Companies Ltd, Tech. Rep., 1990.
- [16] Obla, K.: Variation in Concrete Strength Due To Cement – Part III of Concrete Quality Series, Concrete InFocus, NRMCA, vol. 9, no. 4, pp. 21–23, 2010.
- [17] Sundararaja, C.: Probabilistic Structural Mechanics Handbook: Theory and Industrial Applications. Springer – Science + Business Media, B.V., 1995., <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1771-9>
- [18] Bartlett, F. M., MacGregor, J. G.: Assessment of Concrete Strength in Existing Structures, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Tech. Rep., 1994., <https://doi.org/10.7939/R3C53F22C>
- [19] Haukaas, T., Kiureghian, A. D.: Finite element reliability and sensitivity methods for performance–based earthquake engineering, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Tech. Rep., 2004., [http://apps.peer.berkeley.edu/publications/peer\\_reports/reports\\_2003/0314.pdf](http://apps.peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2003/0314.pdf)

- [20] Bozorgnia, Y., Bertero, V.: Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. CRC Press, 2004., <https://www.crcpress.com/Earthquake-Engineering-From-Engineering-Seismology-to-Performance-Based/Bozorgnia-Bertero/p/book/9780849314391>
- [21] Porter, K.: A beginners guide to fragility, vulnerability, and risk, University of Colorado Boulder and SPA Risk LLC, Denver CO USA, Tech. Rep., 2015., <http://www.sparisk.com/pubs/Porter-beginners-guide.pdf>
- [22] Lee T.-H., Mosalam K. M.: Probabilistic seismic evaluation of reinforced concrete structural components and systems, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, PEER Report 2006/04, Tech. Rep., 2006., [https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/peer\\_604\\_t-h.\\_lee\\_k.\\_mosalam.pdf](https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/peer_604_t-h._lee_k._mosalam.pdf)
- [23] Huang, Y.-N., Whittaker, A. S., Luco, N.: Performance assessment of conventional and base-isolated nuclear power plants for earthquake and blast loadings, University of Buffalo, Technical Report MCEER-08-0019, Tech. Rep., 2008., <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/08-0019.pdf>



## Modeliranje spoja stupa i naglavne ploče mosta

Marino Jurišić<sup>1</sup>

(1) Građevinski fakultet, Sveučilište u Mostaru, Bosna i Hercegovina,  
[marino.jurisc@gf.sum.ba](mailto:marino.jurisc@gf.sum.ba)

### Sažetak

Pri izradi cijelog modela mosta koji uključuje rasponsku konstrukciju, stupove, temelje, upornjake i njihove veze poseban je izazov modeliranje spojeva konstrukcije. U ovom je radu uzet primjer modeliranja spoja stupa, naglavne ploče i pilota mosta na stvarnom projektu mosta Vranduk 2. Spoj je moguće modelirati na više načina, ovisno o tome koji dio promatramo. Pokazane su razlike u modeliranju spoja, te razlike u potrebnoj armaturi. Točnije modeliranje vodi ka realnijem ponašanju konstrukcije čime se na kraju dobije točan raspored potrebne armature.

*Ključne riječi: modeliranje, most, spoj konstrukcije*

### Modelling of the pier-to-foundation slab joint of the bridge

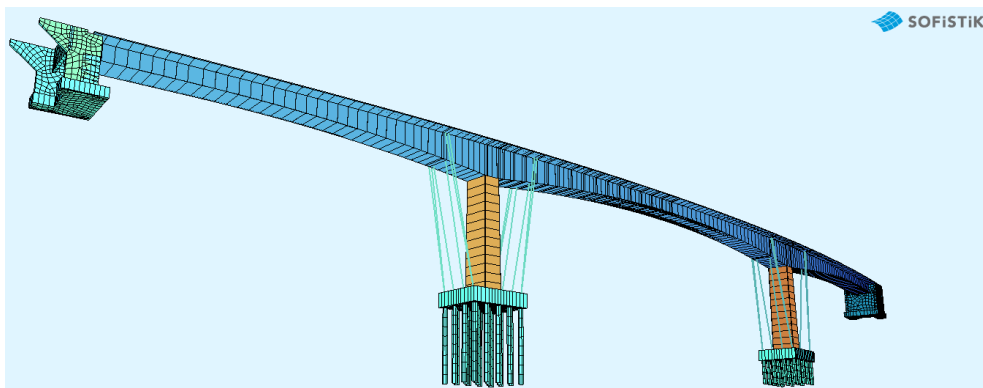
#### Abstract

A special challenge when designing an entire bridge model that includes superstructure, piers, foundations, abutments and their connections is modelling the construction joints. This paper takes an example from a real project where pier, foundation slab and piles were modelled for Vranduk 2 bridge. The joint can be modelled in multiple ways, depending what part of the bridge we focus on. Differences in joint modelling and required steel rebar area will be shown. Accurate modelling leads to real construction behaviour and in the end, gives the correct amount of required steel.

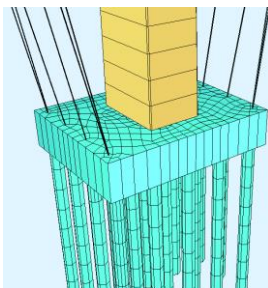
*Keywords: modelling, bridge, construction joint*

## 1. Uvod

U radu su prikazani različiti načini modeliranja spoja stupa, naglavne ploče i pilota mosta Vranduk 2. Ukupna dužina mosta je 340 m, a glavni raspon je 150 m. Rasponska konstrukcija mosta i stupovi su sandučastog poprečnog presjeka. Stupovi su visoki 27 i 31 m, presjeka pri vrhu 4.5 x 6.8 m, prema dnu se šire u nagibu 1:100. Zidovi sanduka u stupovima su debeli 70 cm. Naglavna ploča stupa je dimenzija 16.6 x 13 x 3.5 m i postavljena je centrično u odnosu na stup. Naglavna ploča se naslanja na 4 x 5 pilota promjera 1.2 m na međusobnom razmaku 3.6 m. Zbog jednostavnosti, u radu će se prikazati stup S1, a na stupu S2 su izvršene iste izmjene modela. Stup i piloti su modelirani kao linijski elementi, dok je naglavna ploča modelirana pločastim elementima. U modelu je mijenjana veza između stupa i naglavne ploče, dok je veza između pilota i naglavne ploče ostala uvijek ista (direktna veza *constraintom* [1]) jer je približno točna. Izazov je korektno povezati sandučasti presjek stupa koji je u modelu linija s naglavnom pločom kako bi se dobili realni utjecaji na naglavnu ploču, kao i realan raspored armature. Nakon svakog modela prikazan je dijagram momenata savijanja za prometnu kombinaciju opterećenja kao i dijagram potrebne armature. Na kraju su uspoređeni različiti modeli i njihovi rezultati. Modeliranje se radilo u programskom paketu SOFiSTiK [2], ali principi vrijede za svaki program.



Slika 1. Model mosta

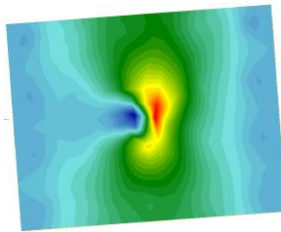


Slika 2. Stupno mjesto S1

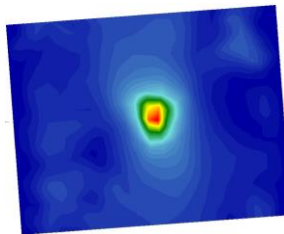
## 2. Modeliranje spoja stupa i naglavne ploče

### 2.1. Direktna veza stupa i naglavne ploče

Prvi i najjednostavniji model je direktna veza stupa i naglavne ploče na isti način kao što su piloti vezani za naglavnu ploču. Veza se radi elementom *constraint* [1] koji kruto povezuje elemente konstrukcije. U ovom slučaju *constraintom* se veže dno stupa s fiktivnom točkom na naglavnoj ploči. Odmah se pojavljuje pitanje realnosti modela. Ovakav model dobro predstavlja pilote jer su relativno vitki i punog su presjeka. Stup mosta je sandučastog presjeka i odmah vidimo da imamo problem prenošenja opterećenja na naglavnu ploču. Sve opterećenje (sile, momenti) će se prenijeti u fiktivnu točku gdje se presijecaju linijski element stupa i ploča, a ne po zidovima stupa. U ovoj točki pojavljuje se koncentracija presječnih veličina, a samim time i veliki skok naprezanja i velika potrebna armatura. Ako promatramo samo stup, ovaj će model biti dovoljan, no ako je potrebno dimenzionirati i naglavnu ploču, vidimo da ovaj model nije realan. Potrebno ga je doraditi, tj. napraviti realno ponašanje konstrukcije. U nastavku su prikazani dijagrami momenata u smjeru X, te dijagrami potrebne armature (cca 450 cm<sup>2</sup>/m).



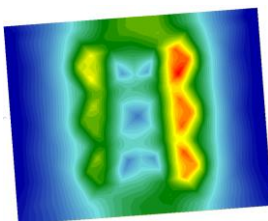
Slika 3. Koncentracija momenata oko sredine ploče



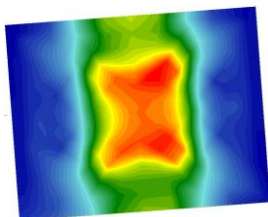
Slika 4. Koncentracija armature oko sredine ploče

### 2.2. Veza stupa i ploče u nekoliko točaka po obodu sanduka stupa

Drugi model se radi tako što dno linijskog elementa stupa povežemo s pločom pomoću više *constraintova*. Ovaj put veze se nalaze po obodu sanduka stupa što bi nam trebalo dati realniju interakciju stupa i naglavne ploče. Kod ovoga modela vidimo da se opterećenje prenosi na točna mjesta u naglavnoj ploči, no opet ostaje prisutan problem koncentracije presječnih veličina blizu točaka *constraintova* na ploči. U nastavku su prikazani dijagrami momenata u smjeru X, te dijagrami potrebne armature (cca 390 cm<sup>2</sup>/m).



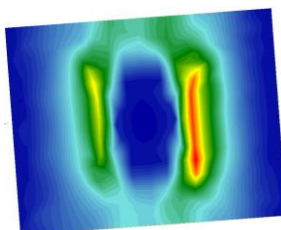
**Slika 5.** Koncentracija momenata oko vezanih točaka



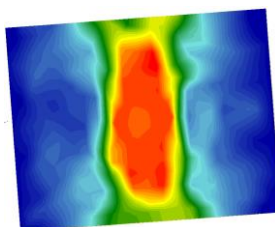
**Slika 6.** Koncentracija armature oko vezanih točaka

### 2.3. Veza stupa i ploče preko fiktivnih greda

Trećim se modelom pokušava riješiti problem koncentracije naprezanja oko točaka vezanja tako što će se opterećenje prenijeti linijski po obodu dna stupa na ploču. Dodatne fiktivne grede se uzimaju kao kruti linijski elementi bez težine tako da ne utječu na vlastitu težinu mosta. Po dijagramu vidimo da dobivamo realnije ponašanje konstrukcije, ali se javlja novi problem. Grede su kruti elementi kao i *constraintovi* što uzrokuje pojavu velikih membranskih sila koje se ne mogu osloboditi i daju veću količinu potrebne armature. U nastavku su prikazani dijagrami momenata u smjeru X, te dijagrami potrebne armature (cca 300 cm<sup>2</sup>/m).



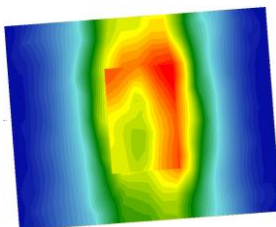
**Slika 7.** Dijagram momenata savijanja



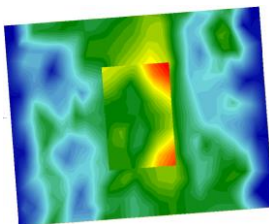
**Slika 8.** Potrebna armatura (nerealan raspored zbog membranskih sila)

## 2.4. Veza stupa i ploče modeliranjem dna stupa pomoćnim pločama

Četvrti model daje najrealnije ponašanje konstrukcije i najbolje rezultate u mješovitim sustavima gdje se trebaju dimenzionirati i pločasti elementi. Naglavna ploča je prikazana središnjom plohom što ostavlja prostor veličine 1.75 m od sredine ploče do dna stupa. Ovaj se prostor koristi da se zidovi sanduka stupa modeliraju pločastim elementima koji se na vrhu povežu *line to point constraintovima* [1] za dno stupa. Ovakva veza znači da se donja točka stupa poveže s linijskim osloncima na vrhu izmodeliranih zidova sanduka. Tako se opterećenje iz stupa prenese preko pomoćnih zidova, koji predstavljaju sanduk stupa, na naglavnu ploču i eliminiraju se sve nepravilnosti i membranske sile koje su ranije pravile problem. Krutost ploča se prilagodi krutosti stupa, a vlastita težina se isključi da ne mijenja stvarno stanje. Pomoćne ploče se ne dimenzioniraju nego se iskoriste za realan prijenos opterećenja s linijskog elementa na pločasti element. U nastavku su prikazani dijagrami momenata u smjeru X, te dijagrami potrebne armature (cca 120 cm<sup>2</sup>/m).



Slika 9. Dijagram momenata savijanja



Slika 10. Potrebna armatura

### 3. Zaključak

Cilj ovog rada je pokazati kako se različitim tehnikama dolazi do točnijeg modeliranja tj. realnog ponašanja konstrukcije. Ovo je posebno važno u današnje vrijeme kada je bolje koristiti integralno modeliranje konstrukcija. Programski paketi svakim danom postaju bolji i imaju veće mogućnosti, a u struci se sve više zahtijeva BIM pristup. Realnije modeliranje nam, osim uštede vremena (jer nije potrebno raditi više modela), nudi i uštedu novca na projektu jer izbacujemo pojednostavljena koja su u pravilu na strani sigurnosti. Most je moguće integralno modelirati (integralno) skupa s tlom i tako dobiti približno točno ponašanje konstrukcije. Idući korak bio bi da se i rasponska konstrukcija i stupovi pokušaju modelirati pločama. Moramo biti svjesni da to zahtijeva puno više računalnog vremena i da će dovesti do nekih drugih problema. (sa sobom će nositi neke druge probleme). Primjerice neki duži mostovi zahtijevaju jako puno konačnih elemenata ako bi cijeli most bio modeliran pločama. Cilj modeliranja je da imamo što realniji model konstrukcije koji se može proračunati i dimenzionirati. Važno je dobro odrediti kada se pojedini dijelovi mogu pojednostavniti, a da model ostane točan. Pri razmatranju lokalnih problema mogu se napraviti posebni modeli koji će to riješiti ili se može napraviti brza ručna provjera. U svakom slučaju, treba imati što je moguće jednostavniji model koji će nam dati što točnije rezultate, što zahtijeva dobro poznavanje zakonitosti konstrukcijskih sustava te mehanike materijala.

### Literatura

- [1] Jurišić, M., Glibić, M.: Numeričko modeliranje slobodno konzolnog mosta u programskom paketu SOFiSTiK, e-Zbornik - elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta u Mostaru 2017.
- [2] SOFiSTiK AG - FEM, BIM and CAD Software for Structural Engineers, [www.sofistik.com](http://www.sofistik.com), 05.08.2018.

## Numeričko adaptivno modeliranje advektivno dominantnih problema koristeći modificirane hijerarhijske Fup bazne funkcije

Grgo Kamber<sup>1</sup>, Hrvoje Gotovac<sup>1</sup>, Vedrana Kozulić<sup>1</sup>, Luka Malenica<sup>1</sup>, Blaž Gotovac<sup>1</sup>

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

### Sažetak

U ovom radu razvijena je nova adaptivna numerička tehnika bazirana na metodi kontrolnih volumena i modificiranim hijerarhijskim *Fup* baznim funkcijama. Takve bazne funkcije spadaju u atomske bazne funkcije, zadovoljavaju razvoj jedinice ("partition of unity") i imaju mogućnost lokalnog poboljšavanja rješenja u obliku *h-p* adaptacije. Adaptivna analiza biti će provedena na nestacionarnoj advekcijsko-disperzijskoj jednadžbi. Efikasnost nove adaptivne tehnike pokazat će se usporedbom numeričkog rješenja dobivenog korištenjem jednolikog rasporeda *Fup* baznih funkcija te onog dobivenog korištenjem adaptivne tehnike i modificiranih hijerarhijskih *Fup* baznih funkcija.

*Ključne riječi:* *h-p adaptacija, hijerarhijske Fup bazne funkcije, advektivno-disperzijska jednadžba, metoda kontrolnih volumena*

## Numerical adaptive modelling of the advective dominant problems using modified hierarchical Fup basis functions

### Abstract

In this paper, a new adaptive numerical technique was developed based on the control volume method and the modified hierarchical *Fup* basis functions. Such basic functions belong to the class of atomic basis functions, satisfy partition of unity and have the ability to locally improve solutions in the form of *h-p* adaptation. An adaptive analysis will be performed on the non-stationary advection-dispersion equation. The efficiency of the proposed adaptive technique will be presented by comparison of the numerical solution obtained by using a uniform distribution of *Fup* basis functions, and the one obtained by using adaptive technique and modified hierarchical *Fup* basis functions.

*Keywords:* *h-p adaptation, hierarchical Fup basis functions, advection-dispersion equation, finite volume method*

## 1. Uvod

Kod rješavanja inženjerskih problema kao što su pronos topline i/ili zagađenja, širenje pukotina ili turbulencija teži se korištenju numeričkih alata koji će ubrzati i pojeftiniti proces. Jedna od ideja je korištenje adaptivnog procesa koji koristi finiju mrežu samo tamo gdje su promjene rješenja zahtjevnije.

Zbog potrebe za lokalnim poboljšanjem baze, došlo je do razvoja određenog broja alata kao što su T-splineovi [1], hijerarhijski B-splineovi [2] i modificirani hijerarhijski B-splineovi [3]. Takva ideja modificiranja baze je implementirana u ovom radu koristeći Fup bazne funkcije [4],[5], koje imaju mogućnost lokalnog poboljšanja i to u obliku h-p adaptacije (podizujući rezolucijski nivo podiže se i red bazne funkcije).

Cilj ovog rada je pokazati na 1D advekcijsko-disperzijskoj jednadžbi prednosti adaptivnog postupka u odnosu na jednoliki raspored baznih funkcija.

## 2. Advekcijsko-disperzivna jednadžba

Diskretizacija parcijalne diferencijalne jednadžbe (PDJ) biti će predstavljena na 1D advekcijsko-disperzijskoj jednadžbi (ADJ) u obliku:

$$\frac{\partial c(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x, t)}{\partial x^2} - V \frac{\partial c(x, t)}{\partial x}, x \times t \in (a, b) \times (0, \infty) \quad (1)$$

s početnim uvjetima:

$$c(x, 0) = C_0(x) \quad (2)$$

i rubnim uvjetima:

$$c(a, t) = G(t), \frac{\partial c(b, t)}{\partial x} = H(t) \quad (3)$$

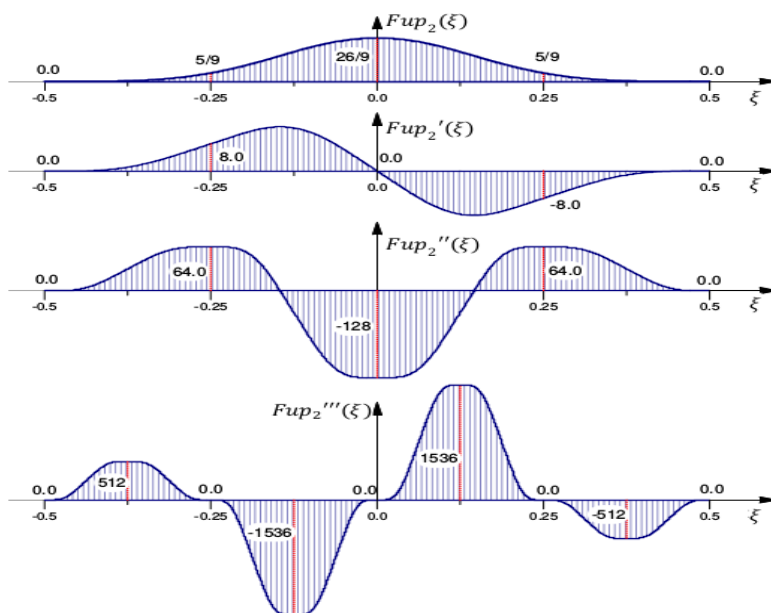
gdje  $c$  (koncentracija u pronosu mase) predstavlja rješenje početno-rubnog problema (1)-(3), a  $D$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] i  $V$  [ $\text{m}/\text{s}$ ] su koeficijenti disperzije i brzine koji u općenitom slučaju mogu biti funkcije prostora, vremena i/ili nepoznatog rješenja.

## 3. Metodologija

### 3.1. Bazne funkcije

Fup funkcije pripadaju klasi atomskih baznih funkcija i jako su bliske više poznatim B-spline funkcijama. Za razliku od B-spline funkcija, funkcije  $Fup_n(\xi)$  su finite funkcije iz klase  $C^\infty$ , gdje  $n$  označava najviši stupanj polinoma koji se može točno prikazati u obliku linearne kombinacije baznih funkcija dobivenih pomicanjem funkcije  $Fup_n(\xi)$  za karakteristični odsječak veličine  $\Delta\xi=2^{-n}$  [4],[5]. Derivacije  $Fup_n(\xi)$  baznih funkcija su kontinuirane i glatke funkcije, što se vidi na slici 1., gdje je prikazana Funkcija  $Fup_2(\xi)$  i njene prve tri derivacije [4].





Slika 1. Fup<sub>2</sub> i njene prve tri derivacije

### 3.2. Hijerarhijske modificirane Fup bazne funkcije

Hijerarhijske Fup bazne funkcije imaju mogućnost lokalnog poboljšanja rješenja, na način da se može mijenjati jedna ili više baznih funkcija s ciljem bolje i efikasnije aproksimacije rješenja. U istraživanju u Wei i koautora izložena je procedura hijerarhijskih B-spline baznih funkcija koristeći B<sub>3</sub>-spline bazne funkcije [3]. Slična ideja je implementirana u ovom radu koristeći Fup<sub>n</sub> bazne funkcije koje također imaju mogućnost razvoja hijerarhijskih baznih funkcija. Prvo se na rezolucijskom nivou "0" postavi skup jednoliko raspoređenih baznih funkcija (uniformni grid). Zatim se prema [3,4] ta baza može proširiti, zamjenjujući svaku odabranu Fup baznu funkciju s više baznih funkcija na prvom rezolucijskom nivou. Takva zamjena ukazuje na lokalno poboljšanje baze nivou "0" koja koristi jednoliki raspored baznih funkcija istog reda. Poboljšanje će se vršiti rekurzivno, sve do maksimalnog rezolucijskog nivoua ili dok se ne zadovolji početna zadana točnost adaptivnog procesa ( $\epsilon_{\text{adap}}$ ). U nastavku će biti objašnjena konstrukcija dva uzastopna nivoua. Razlika primjene B-spline i Fup baznih funkcija u proceduri hijerarhijskih baznih funkcija iz [3] je u procesu konstruiranja višeg rezolucijskog nivoua "l+1".

Za B-splineove vrijedi:

$$B_{i,p}^l(\xi) = \sum_{k=0}^{p+1} c_{i,k}^p \cdot B_{2i+k,p}^{l+1}(\xi); \quad c_{i,k}^p = \frac{1}{2^p} \binom{p+1}{k}, \quad i = 0, 1, \dots, n^l - 1 \quad (4)$$

Iz čega je vidljivo da se jedna B<sub>n</sub>-spline funkcija s nivoua "l" zamjenjuje s n+2 B<sub>n</sub>-spline baznih funkcija na nivou "l+1".

Kod  $Fup_n$  baznih funkcija u procesu konstruiranja rezolucijskog nivoa " $l+1$ " jedan  $Fup_n$  zamjenjuje s  $n+2$   $Fup_{n+1}$  baznih funkcija (slika 2) prema izrazu:

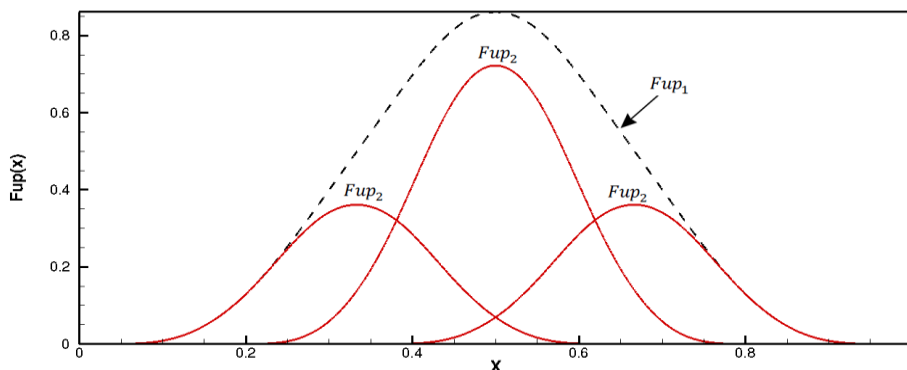
$$Fup_n^l(\xi) = \sum_{k=0}^{n+1} c_{n+1}^k \cdot Fup_{n+1}^{l+1}\left(\xi - \frac{k}{2^{n+1}} + \frac{n+1}{2^{n+2}}\right); \quad c_{n+1}^k = \frac{1}{2^{n+1}} \binom{n+1}{k} \quad (5)$$

Dakle, koristeći *Fup* bazne funkcije dobiva se baza koja na svakom rezolucijskom nivou povećava red *Fupa*.

Kako bi se ostvarilo bitno svojstvo  $\sum Fup_n^l(\xi) = 1$ , *Fup* bazne funkcije se modificiraju na način:

$$Fup_n^{l*}(\xi) = \frac{1}{2^n} Fup_n^l(\xi); \quad Fup_{n+1}^{l+1*}(\xi) = \frac{1}{2^n} Fup_{n+1}^{l+1}(\xi) \quad (6)$$

te se nadalje radi s modificiranom *Fup* bazom koja ispunjava svojstvo razvoja jedinice.



**Slika 2.** Funkcija  $Fup_1$  u obliku linearne kombinacije  $Fup_2$  baznih funkcija

### 3.3. Adaptivna strategija

Nepoznato rješenje se izražava pomoću linearne kombinacije nepoznatih koeficijenata i baznih funkcija:

$$c(x, t) = \sum_j \alpha_j(t) \cdot \varphi_j(x) \quad (7)$$

gdje  $\alpha_j(t)$  predstavlja koeficijente baznih funkcija, a  $\varphi_j(x)$  *Fup* bazne funkcije.

Primjenom formulacije kontrolnih volumena [6] na ADJ (1) dobiva se:

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial \alpha_j(t)}{\partial t} dt \int_{\Omega_i} \varphi_j(x) dx = \int_t^{t+\Delta t} \alpha_j(t) dt \left[ \int_{\Omega_i} D \frac{\partial^2 \varphi_j(x)}{\partial x^2} dx - \int_{\Omega_i} V \frac{\partial \varphi_j(x)}{\partial x} dx \right] \quad (8)$$

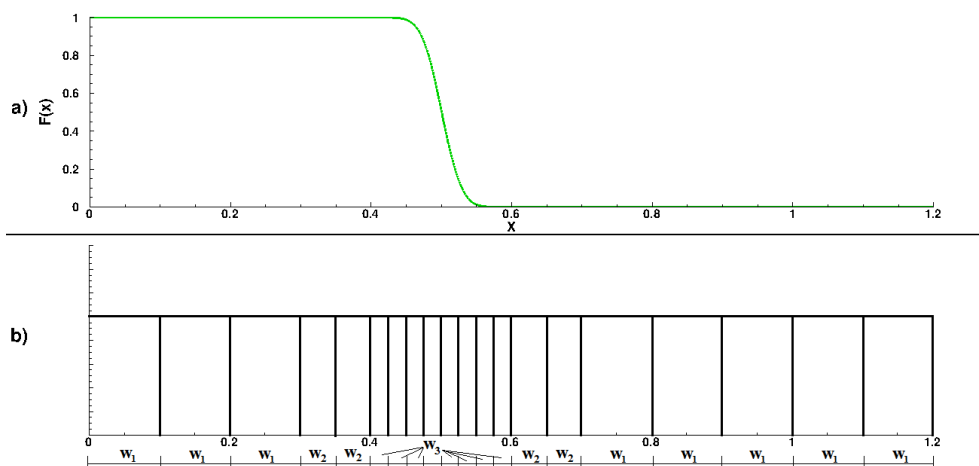
Kada se postavje jednadžbe za sve unutrašnje kontrolne volumene s potrebnim rubnim jednadžbama, dovodi se do konačnog skupa algebarskih jednadžbi u obliku:

$$Au = b \quad (9)$$

gdje je  $\mathbf{A}=\{a_{ij}\}$  matrica sustava,  $\mathbf{u}=\{u_i^{t+\Delta t}\}$  vektor nepoznanica *Fup* koeficijenata, a  $\mathbf{b}=\{b_i\}$  vektor "desne strane".

Prvo se numeričko rješenje dobije temeljem jednolikog rasporeda kontrolnih volumena (0-ti nivo), nakon čega se računa pogreška na kontrolnom volumenu upola manje širine. Zatim

se za sve one kontrolne volumene koji nisu zadovoljili parametar adaptacije uvodi novi rezolucijski nivo. Postupak se ponavlja sve dok kriterij adaptacije nije zadovoljen na svakom kontrolnom volumenu ili se postigne najveći mogući rezolucijski nivo. Za očekivati je da će finiji raspored kontrolnih volumena biti u dijelu domene gdje je promjena rješenja zahtjevnija (slika 3). Dobiveni raspored predstavlja odgovarajuću računalnu mrežu potrebnu za definiranje prostorne diskretizacije PDJ za trenutni vremenski trenutak. Takav raspored vrijedi za jedan globalni vremenski korak što znači da se nakon svakog globalnog vremenskog koraka mora odrediti novi raspored baznih funkcija i kontrolnih volumena. Unutar svakog globalnog vremenskog koraka postoje lokalni vremenski koraci, koji predstavljaju vremenski korak diskretizacije PDJ. Adaptivna procedura dinamički prati promjene rješenja tako da u svakom globalnom vremenskom koraku generira gušći raspored kontrolnih volumena upravo tamo gdje su najveći gradijenti i promjene rješenja.



**Slika 3.** Primjer oštrog fronta (a) i shematski prikaz adaptivnog rasporeda kontrolnih volumena (b)

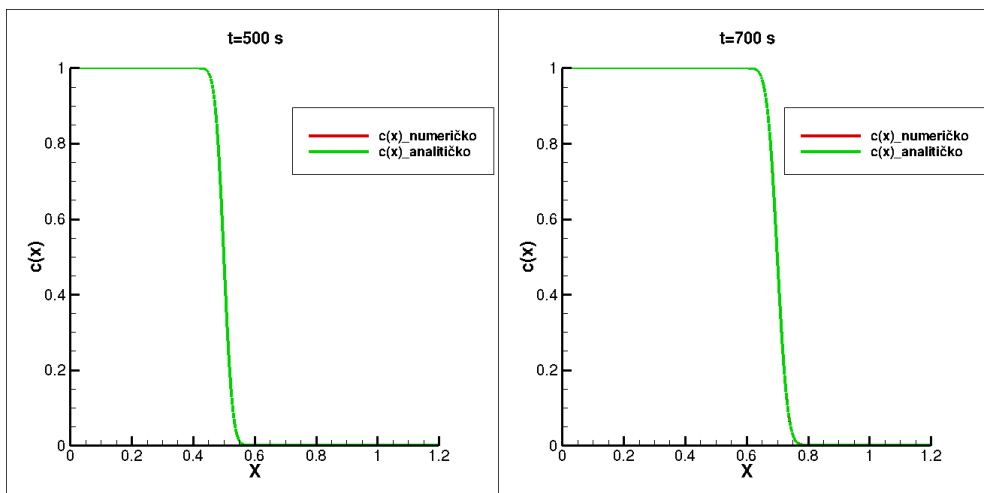
## 4. Rezultati

Zadana je 1D ADJ s konstantnim koeficijentima disperzije ( $D=10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ) i brzine ( $V=10^{-7} \text{ m/s}$ ), parametrom adaptacije  $\varepsilon_{\text{adapt}}=5 \cdot 10^{-4}$ , te početnim i rubnim uvjetima:

$$c(x, 0) = C_0(x) \tag{10}$$

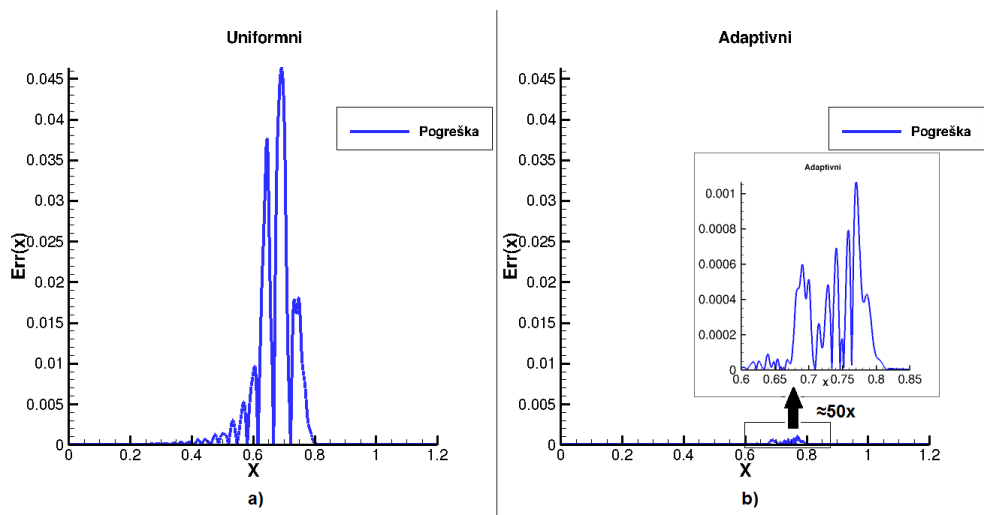
$$c(0, t) = 1; \quad \frac{\partial c(L, t)}{\partial x} = 0 \tag{11}$$

U ovom radu se prikazuje rješenje (slika 4.) dobiveno adaptivnom tehnikom za početni trenutak  $t=500 \text{ s}$  i rješenje dobiveno nakon  $200 \text{ s}$  ( $t=700 \text{ s}$ ) unutar 4 globalna koraka (4 adaptivne mreže) u kojem je bilo 10 000 lokalnih koraka ( $\Delta t_{\text{LOK}}=0.005 \text{ s}$ ).



Slika 4. Rješenje adaptivnom tehnikom u trenutku  $t=500s$  (a) i  $t=700s$  (b)

Početni raspored je definiran kao 66 jednoliko raspoređenih  $Fup_1$  baznih funkcija, dok adaptivna baza sadrži 82 bazne funkcije (3 rezolucijska nivoa,  $Fup_1+Fup_2+Fup_3$ ) dobivene integralnim zadovoljenjem adaptivnog kriterija ( $\epsilon_{\text{adapt}}=5 \cdot 10^{-4}$ ) na svim kontrolnim volumenima. Apsolutna pogreška je dana uspoređujući jednoliki i adaptivni raspored baznih funkcija (slika 5.), gdje se vidi prednost korištenja h-p adaptacije u odnosu na jednoliki raspored baznih funkcija kod rješavanja problema koji imaju veliki diskontinuitet. Odstupanje numeričkog rješenja od analitičkog može se kontrolirati mijenjajući kriterij adaptacije.



Slika 5. Greška aproksimacije uniformnog (a) i adaptivnog rješenja (b) za  $t=700s$

## 5. Zaključak

U radu je korištena tehnika hijerarhijskih adaptivnih *Fup* baznih funkcija koje podižući rezolucijski nivo povećavaju i red bazne funkcije. Takva h-p tehnika adaptacije nije moguća s klasičnim spline baznim funkcijama. Adaptivna procedura primijenjena je na rješavanju 1D ADJ gdje je adveksijski član dominantan. Zbog početnog uvjeta, koji stvara oštri gradijent, i dominantne advekcije koji takav problem provodi kroz domenu, dolazi se do potrebe za poboljšanjem baze koja će moći točnije i efikasnije opisati problem u svakom trenutku. Pokazana tehnika pokazala je poboljšanje u numeričkoj aproksimaciji problema u odnosu na uniformni raspored baznih funkcija, što se najbolje očituje kroz prikaz pogreške uniformnog i adaptivnog rješenja u zadnjem globalnom trenutku.

## Zahvala

Zahvaljujemo što je ovo istraživanje financirala Hrvatska zaklada za znanost kroz znanstveni projekt "Modeliranje tečenja u krškim vodonosnicima"; UIP-2013-11-8103.

## Literatura

- [1] Sederberg, T.W., Cardon, D.L., Finnigan, G.T., North, N.S., Zheng, J., Lyche, T.: T-spline simplification and local refinement, *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):276-283, 2004., doi: 10.1145/1015706.1015715
- [2] Forsey, D.R., Bartels, R.H.: Hierarchical B-spline refinement, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 22(4):205-212, 1988., doi: 10.1145/54852.378512
- [3] Wei, X., Zhang, Y., Hughes, T.J.R., Scott, M. A.: Truncated hierarchical Catmull-Clark subdivision with local refinement, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 291, pp.1-20, Jul. 2015., doi: 10.1016/j.cma.2015.03.019
- [4] Kurbaša, N. B.: Eksponecijalne atomske bazne funkcije: razvoj i primjena, Disertacija, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, geodezije i arhitekture, Split, 2016.
- [5] Gotovac, H.: Tečenje i pronos s promjenjivom gustoćom u vodonosnicima, Magistarski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, geodezije i arhitekture, Split, 2005.
- [6] Patankar, S.V.: *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Pub., 1980., doi: 10.1201/9781482234213



## Primjena i integracija sustava BIM i ERP u građevinarstvu

Sonja Kolarić<sup>1</sup>, Mladen Vukomanović<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, {skolaric;  
mvukoman}@grad.hr

### Sažetak

Neprestani razvoj *Building Information Modeling* (BIM) sustava, koji omogućuju stvaranje baze podataka pojedinog projekta, te *Enterprise Resources Planning* (ERP) sustava, koji omogućuju upravljanje bazama podataka svih projekata u kojima poduzeće posluje, pridonose njihovoj širokoj primjeni. Kontrola izvedbe projekta često se obavlja na temelju procijenjenih podataka iz projektne dokumentacije koji nisu jednaki naručenim, ugrađenim te naplaćenim količinama. Dakle, podaci unutar projekta neće biti ažurni niti točni ako se ne povežu s računovodstvenim podacima unutar poduzeća. Problem je prepoznat i u praksi te se razvijaju modeli integracije sustava BIM i ERP koji su u ovom radu analizirani i uspoređeni. Rezultati pokazuju da su trenutni modeli integracije vezani za specifične sustave te da se BIM tehnologija ne primjenjuje u punom obliku. Buduće će istraživanje stoga obuhvatiti određivanje varijabli projekta i poduzeća koje utječu na modeliranje standardnog protoka informacija među sustavima.

*Ključne riječi: BIM, ERP, građevinarstvo, integracija sustava BIM i ERP*

## Application and integration of BIM and ERP systems in civil engineering

### Abstract

Continuous development of Building Information Modeling (BIM) systems, which enable the creation of a single project database, and Enterprise Resources Planning (ERP) systems, which enable database management of all company's projects, contribute to their wide application. Project execution control is often based on estimated project documentation data which are not the same as the ordered, built and charged quantities. Hence, the data in the project will not be accurate if they do not correlate with the company's accounting data. The problem has also been recognized in practice why integration models of BIM and ERP systems have been developed which are analysed and compared in this paper. The results show that current integration models have been related to specific systems and that BIM technology has not been fully applied. Future research will, therefore, include the determination of project and company variables that influence the standard flow information modelling between systems.

*Keywords: BIM, ERP, civil engineering, BIM and ERP systems integration*

## 1. Uvod

Građevinska poduzeća svoje poslovanje baziraju na troškovno, vremenski i lokacijski varijabilnim projektima koji za svoje izvršenje troše različite resurse dostupne unutar i izvan promatranog poduzeća [1, 2]. Svako građevinsko poduzeće nastoji ostvariti ravnotežu između unutarnjih kapaciteta i stvarnog rada, uz maksimalno iskorištenje vlastitih resursa [1, 2]. U cilju ostvarenja navedenog, informatizacija je zahvatila građevinsku industriju te se trenutno primjenjuje mnogo specijaliziranih računalnih aplikacija u svrhu planiranja, kalkulacije, statičke analize, proračuna fizike zgrade, itd. Razvojem *Building Information Modeling* (BIM) tehnologije, takav se razvoj usmjerava prema jednom konceptu koji objedinjuje rad svih sudionika projekta [3]. Budući da je jedan projekt samo manji segment čitavog poslovanja građevinskog poduzeća, uz BIM sustave, primjećuje se sve veća primjena *Enterprise Resource Planning* (ERP) sustava koji daju podršku pravilnom poslovanju poduzeća [3]. Dakle, primjena BIM sustava omogućuje stvaranje baze podataka pojedinog projekta, dok primjena ERP sustava omogućuje upravljanje bazama podataka svih projekata u kojima promatrano poduzeće posluje, a što će se ovim člankom detaljnije prikazati. U drugom će se poglavlju objasniti pojmovi koncepata i sustava BIM i ERP te njihova primjena u građevinarstvu. U trećem će se poglavlju objasniti potreba za povezivanjem razmatranih sustava te će se analizirati i usporediti dosadašnji modeli integracije sustava BIM i ERP. Na kraju će se iznijeti zaključak analize modela te smjer budućeg istraživanja.

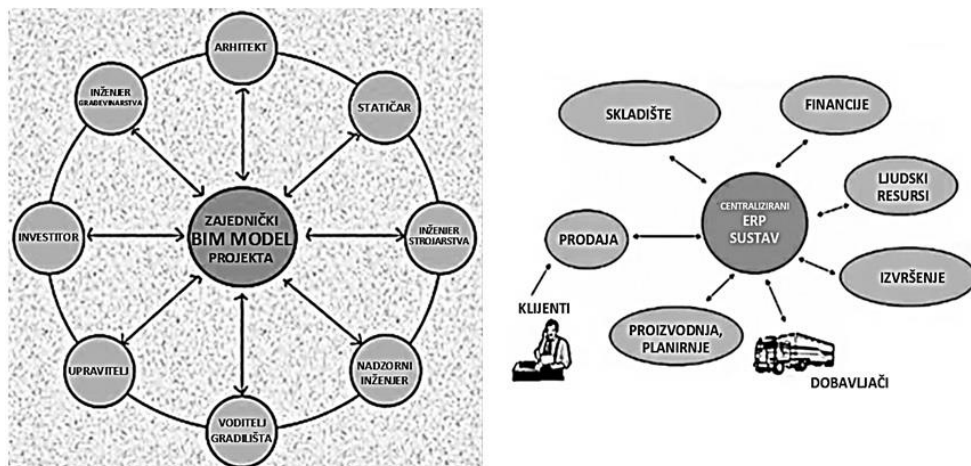
## 2. Primjena sustava BIM i ERP u građevinarstvu

BIM koncept predstavlja općeprihvaćen koncept koji grupira i polako zamjenjuje dosadašnje alate i pristupe u projektiranju, statičkoj analizi, vremenskom planiranju, procjeni troškova, upravljanju projektima, itd. [3, 4]. Pritom se u centru svakog projekta nalazi BIM model (Slika 1, lijevo [5]), odnosno zajednička baza podataka koja povezuje sve sudionike u projektu. Svaki sudionik projekta korištenjem vlastitog BIM sustava (koji podržava BIM standard) nadopunjuje BIM model koji se napredovanjem projekta ažurira, prati i kontrolira [3]. BIM standardi [6] (npr. *Industry Foundation Classes* (IFC, ISO 16739), BS 1192:2007, PAS 1192-5:2015, itd.) omogućuju praktičnu primjenu BIM-a, a razvijaju ih brojne organizacije (npr. *International Organization for Standardization* (ISO), *buildingSMART*, *British Standards Institution* (BSI), itd.). Koristi implementacije BIM koncepta su brojne: smanjenje grešaka i propusta; povećanje suradnje između sudionika tijekom raznih faza projekta; smanjenje ponovnog rada, troškova i trajanja izvedbe itd. [3, 4, 7]. Važnost i koristi BIM tehnologije prepoznale su brojne svjetske države zbog čega je primjena BIM-a u mnogim zemljama postala zakonska obveza [3, 4].

ERP koncept podrazumijeva efektivno planiranje i kontrolu resursa unutar poduzeća povezivanjem i automatizacijom svih poslovnih procesa korištenjem ERP sustava (Slika 1, desno [8]) koji sve odjele poduzeća povezuje u jednu integralnu cjelinu [9]. ERP sustavi razvili su se za potrebe proizvodnje i praćenja lanca opskrbe, no danas se koriste u većini srednjih i velikih poduzeća [1, 2]. Zbog specifičnosti građevinske industrije (orijentiranost na



projekte), prilagođeni su njenim specifičnostima i to tako da su razvijeni specifični moduli [2] za potrebe građevinarstva kao npr. natječaji (ponude), kontrola projekta, upravljanje podizvođačima, projektiranje i inženjerstvo, vremensko planiranje, itd.



Slika 1. Okosnica BIM (lijevo) [prilagođeno prema 5] i ERP (desno) [prilagođeno prema 8] koncepta

### 3. Integracija sustava BIM i ERP u građevinarstvu

Kako je prethodno pojašnjeno, BIM model formira se za potrebe svakog pojedinog projekta i predstavlja kompleksnu okolinu koja povezuje sve ključne sudionike projekta. Iako kompleksan, jedan je projekt samo mali segment čitavog poslovanja poduzeća te je podatke svakog projekta (pojednog BIM modela) potrebno povezati ERP sustavom [10, 11, 12]. Takva integracija omogućuje nesmetano odvijanje procesa u svakom od sustava, razmjenu informacija između sustava te praćenje poslovanja poduzeća (centra) [10, 11, 12]. Također, obradom podataka bi se moglo utjecati na poslovanje poduzeća u budućim projektima. Predstavljeni problem prepoznat je i u praksi [10, 11, 12] zbog čega se razvijaju modeli integracije sustava BIM i ERP. Neki su od njih predstavljeni u nastavku.

Prvi model je model CERP sustava unutar kojeg je povezanost poslovnih procesa te sudionika projekta ostvarena korištenjem jednog integriranog informacijskog sustava s centraliziranom bazom podataka [2]. Drugi model integrira CAD i ERP sustave s gradilištem tako da se BIM model definira pomoću CAD alata (informacije o prostoru) i aplikacije *Microsoft Project* (informacije o vremenu) te takav određuje procese u ERP sustavu [13, 14]. Treći razmatrani model je upravljanje lancem opskrbe automatiziranim sustavom praćenja izvršenja projekta temeljenim na 4D BIM modelu (nakon izvršenja dijela projekta, prikupljaju se i sintetiziraju podaci o stvarno izvedenom stanju, BIM model se revidira te se procesi u ERP sustavu mijenjaju u skladu s potrebama) [15]. Četvrti model integrira BIM, ERP i sustav za upravljanje životnim ciklusom proizvoda (engl. Product Lifecycle Management (PLM) sustav) [16]. U tom se modelu BIM sustav koristio za stvaranje baze podataka iz koje su se podaci prenosili u PLM sustav te je kasnije zamišljena integracija PLM i ERP sustava [16].

Peti [17], šesti [18] i sedmi [19] modeli integracije su modeli softverskih kompanija pri čemu INTELSYS povezuje BIM softvere *Revit* i *Navisworks* s ERP softverom *SAP* [17]; *Vico* kompanija nudi dvosmjernu komunikaciju između BIM softvera *Vico Software 5D* i ERP sustava [18]; *OliiO Technologies* predlaže model u kojem se ERP sustav (*Oracle*, *Epicor*, *Microsoft Dynamics*) puni odvijanjem poslovnih procesa te se prilagodbom mreže, informacije šalju u BIM model (*Revit*) i definiraju buduće projekte (projektiranje, planiranje, itd.) [19].

Opisani su modeli analizirani te uspoređeni prema kriterijima analize i usporedbe, a rezultati su prikazani u Tablici 1. Kriteriji su sljedeći: (1) validacija (verifikacija) modela; (2) korištenje BIM koncepta u punom obliku (interoperabilnost, kolaboracija, podržavanje IFC standarda...); (3) ostvarenje inicijalno postavljenog modela; (4) ograničenost modela na specifične BIM i/ili ERP sustave; (5) definiranje detaljnog protoka informacija putem sustava (vrsta informacije, trenutak prijenosa informacije...) modela. U tablici *da* znači da je postavljeni kriterij ostvaren, *ne* da postavljeni kriterij nije ostvaren, *+/-* da je postavljeni kriterij djelomično ostvaren, dok *-* znači da u izvoru nema podataka o postavljenom kriteriju. Za bolje shvaćanje rezultata vezanih za četvrti kriterij, napominjemo da u tablici *ne* znači da model nije ograničen, dok *da* znači da je razmatrani model ograničen na specifične BIM i/ili ERP sustave.

**Tablica 1.** Analiza i usporedba modela integracije sustava BIM i ERP

Autor (godina)	Model integracije	Kriteriji analize i usporedbe modela				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Tatari i dr. (2008.)	CERP [2]	-	-	-	-	-
Čuš-Babić i dr. (2010., 2014.)	CAD, ERP, gradilište [13, 14]	da (jednostavni procesi u poduzeću)	Ne	da	- (CAD, ERP), da (gradilište)	da
Rebolj i dr. (2008.)	Upravljanje lancem opskrbe [15]	da (jednostavni procesi u poduzeću)	Ne	ne	-	da
Holzer (2016.)	BIM, ERP, PLM [16]	da (jednostavni procesi u poduzeću)	Ne	ne	da	+/-
INTELSYS (2017.)	BIM, ERP [17]	-	-	-	da	+/-
Vico Software (2017.)	BIM, ERP [18]	-	-	-	da	+/-
OliiO Technologies (2017.)	BIM, ERP [19]	-	-	-	da	+/-

Iz Tablice 1 je vidljivo kako je model CERP sustava teorijski postavljen model koji nije razrađen u detalje (ni jedan postavljeni kriterij nije razrađen). Također, jednim informatičkim sustavom teško se može ostvariti integracija poslovanja svih sudionika, praćenje izvršenja

projekta te sagledavanje utjecaja na svako pojedino poduzeće. Drugi model integracije CAD i ERP sustava s gradilištem verificiran je u poduzeću s jednostavnijim poslovnim procesima (jedno poduzeće projektira, proizvodi i montira predgotovljene elemente) što zahtijeva daljnju analizu modela kod primjene u kompleksnoj okolini. Također, u drugom razmatranom modelu integracije, BIM model ne predstavlja glavno mjesto pohrane podataka, inicijalni model nije ostvaren, no protok informacija je jasno definiran. Nadalje nema podataka o ograničenosti modela na specifične CAD ili ERP sustave, dok je za komunikaciju s gradilištem, model ograničen na *Microsoft Project* aplikaciju. Model upravljanja lancem opskrbe također je verificiran u poduzeću s jednostavnim poslovnim procesima, no nije mogao biti posve primijenjen u praksi jer zahtijeva visoki stupanj informatizacije poduzeća te primjenu BIM sustava u cijelosti. U opisu modela nema podataka je li model ograničen na specifične sustave, no protok informacija je jasno i detaljno definiran. Četvrti model je model integracije BIM, ERP i PLM sustava verificiran u poduzeću koje projektira, proizvodi i montira predgotovljene elemente (jednostavni poslovni procesi). U inicijalnom modelu nije zamišljena implementacija BIM-a u potpunosti zbog čega inicijalni model nije mogao biti ostvaren. Štoviše, nedostaci PLM sustava zahtijevali su zamjenu BIM sustava (*Revit*) CAD sustavom (*Inventor*) kako bi se projekt mogao dovršiti. Konačno, povezanost između BIM i ERP sustava nije ostvarena, model je ograničen na specifične sustave, dok je protok informacija definiran, no ne detaljno, što je također bio jedan od problema provedbe modela. Modeli softverskih kompanija (*INTELSYS*, *Vico Software 5D*, *OliIO Technologies*) su nepotpuni i ograničeni radom vlastitog softvera ili softvera kompanije s kojom surađuju te su predstavljeni i definirani više u svrhu marketinga, a ne njihove detaljne analize.

#### 4. Zaključak

Analizom i usporedbom postojećih modela integracije BIM i ERP sustava pokazano je kako se koncept BIM tehnologije u većini modela ne primjenjuje u svom punom obliku, već predstavlja samo centraliziranu bazu podataka i mjesto komunikacije sudionika projekta te da su trenutna rješenja integracije sustava BIM i ERP vezana za specifične sustave [11, 12]. Stoga zaključujemo kako standardni protok informacija kroz sustave još uvijek nije definiran. Drugim riječima, kontrola izvedbe projekta se obavlja na temelju prvotnih procijenjenih podataka iz projektne dokumentacije koji nisu jednaki uistinu naručenim, ugrađenim te naplaćenim količinama. Dakle, podaci unutar projekta odvajanjem navedenih sustava nikada nisu ažurni niti točni. Buduće istraživanje će u skladu s tim obuhvatiti razvoj i modeliranje standardnog protoka informacija među sustavima te modeliranje komunikacije između poduzeća i projekta. Pritom će se detaljnom analizom stvarnih projekata odrediti varijable projekta i poduzeća koje utječu na definiranje standardnog modela integracije (npr. tip projekta, model ugovaranja...) te varijable za praćenje utjecaja primjene modela integracije na projekt i poduzeće.

## Literatura

- [1] Shi, J.J., Halpin, D.W.: Enterprise resource planning for construction business management, *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(2), pp. 214-221, 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:2(214).
- [2] Tatari, O., Castro-Lacouture, D., Skibniewski, M.J.: Performance evaluation of construction enterprise resource planning systems, *Journal of Management in Engineering* 24(4), pp. 198-206, 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0742-597X(2008)24:4(198).
- [3] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K.: *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] Holness, G.: Future Direction of the Design and Construction Industry: Building Information Modelling, *ASHARAE Journal*, 48(8) , pp. 38-46, 2006.
- [5] BIM model, <https://www.slideshare.net/berlotti/central-bim-model>, 15.06.2018.
- [6] BIM Levels, <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-levels-explained>, 23.07.2017.
- [7] Hore, A.V., Scott, L., Wes, R., Tibaut, A.: Benefits of inter-institutional collaboration in the delivery of BIM education in Ireland: Reflections of an Irish masters program, *Proceedings of the Academic Interoperability Coalition: 10th BIM Academic Symposium*, Orlando, Florida, pp.152-164, 2016.
- [8] ERP model, <https://www.guru99.com/what-is-sap-definition-of-sap-erp-software.html>, 15.06.2018.
- [9] Vuković, A., Džambas, I., Blažević, D.: Development of ERP Concept and ERP System, *Engineering Review* 27(2), pp.37-45, 2007.
- [10] Santos, E.T.: BIM and ERP: finding similarities on two distinct concepts, 5th CIB W102 Conference: Deconstructing Babel: Sharing Global Construction Knowledge, Rio de Janeiro, 2009.
- [11] Kolarić, S., Vukomanović, M.: Pregled i analiza dosadašnjih modela integracije sustava BIM i ERP, 3. simpozij doktorskog studija građevinarstva, Zagreb, pp. 71-81, 2017, doi: <https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2017.04>.
- [12] Kolarić, S., Vukomanović, M.: Potential of BIM and ERP Integration in Contractor Construction Companies, 13 th International Conference OTMC, Poreč, pp. 669-673, 2017.
- [13] Čuš-Babič, N., Rebolj, D., Nekrep-Perc, M., Podbreznik, P.: Supply-chain transparency within industrialized construction projects, *Computers in Industry*, 65 (2), pp. 345-353, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.12.003>.
- [14] Čuš-Babič, N., Podbreznik, P., Rebolj, D.: Integrating resource production and construction using BIM, *Automation in Construction*, 19(5), pp. 539-543, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.005>.
- [15] Rebolj, D., Čuš-Babič, N., Magdič, A., Podbreznik, P., Pšunder, M.: Automated construction activity monitoring system, *Advanced engineering informatics* 22(4), pp. 493-503., 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2008.06.002>.
- [16] Holzer, D.: *Fostering the link from PLM to ERP via BIM*, IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 75-82, 2014.
- [17] INTELSYS, <http://www.intelsys.eu/>, 23.07.2017.
- [18] Vico, [http://www.vicosoftware.com/blogs/vicos\\_flying\\_dutchman/topic/bim-outputs-feed-erp](http://www.vicosoftware.com/blogs/vicos_flying_dutchman/topic/bim-outputs-feed-erp), 23.07.2017.
- [19] Olilo, [http://www.olilo.ae/revit\\_erp\\_integration.html](http://www.olilo.ae/revit_erp_integration.html), 23.07.2017.

## Rekonstrukcija Studentskog doma Ivan Goran Kovačić u Osijeku

Marija Krajnović<sup>1</sup>

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

### Sažetak

Studentski dom Ivan Goran Kovačić izgrađen je 1962. prema projektu arhitekta Slavka Lowyja i do 2017. nije bilo većih ulaganja u njegovu obnovu. Cilj rekonstrukcije objekta bio je podizanje standarda stanovanja u studentskom domu, koji je bio neprimjeren današnjem standardu, pri čemu se vodila briga i o studentima s invaliditetom kao i o znatnom poboljšanju energetske učinkovitosti same zgrade. Unutar rekonstrukcijskog zahvata podignut je nivo protupožarne zaštite izvedbom protupožarnog stubišta i osiguravanja površine za manipulativan rad vatrogasnog vozila. Obnovljeni studentski dom ima 193 ležaja u jednokrevetnim, dvokrevetnim i trokrevetnim sobama te sobama za osobe s invaliditetom. Sve sobe su klimatizirane, opremljene hladnjacima i internet priključcima. Po dvije sobe dijele zajednički sanitarni čvor, a na svakome katu smještena je čajna kuhinja. Rekonstrukcija je financirana nepovratnim sredstvima EU-a (70%) i sredstvima Sveučilišta u Osijeku (30%), a ukupna vrijednost projekta iznosila je približno 17 milijuna kuna.

*Ključne riječi: studentski dom, rekonstrukcija, povećanje standarda, EU fondovi, Osijek*

### Reconstruction of the student dormitory Ivan Goran Kovačić in Osijek

#### Abstract

The student dormitory Ivan Goran Kovačić was built in 1962 according to the Slavko Lowy's architectural drawings and until 2017 there were no substantial investments in its renovation. The aim of reconstruction was to increase the living standard in the student dormitory, which was inappropriate for modern standards. Special considerations were made regarding students with disabilities, as well as to considerably improve the energy efficiency of the building itself. Reconstruction procedure includes raising the level of fire protection through designing a fire escape and implementing a space for the manipulative operation of a fire suppression vehicle. The renovated student dormitory has a capacity of 193 beds rearranged in single, double and triple rooms, as well as the rooms for persons with disabilities. All rooms are air-conditioned, equipped with refrigerators, and Internet access. Two rooms share a single bathroom, and there is a kitchenette located on each floor. The reconstruction was financed through non-refundable funds of the EU (70%) and the funds from the University of Osijek (30%), and the overall cost of the project was approx. 17 million Croatian kunas.

*Keywords: dormitory, reconstruction, standard increase, EU funds, Osijek*

## 1. Uvod

Rekonstrukcija *Studentskog doma Ivan Goran Kovačić* trajala je od ožujka 2015. godine do srpnja 2017. godine uključujući vrijeme projektiranja i izvođenja radova na objektu. Zbog visokih troškova grijanja, na zgradi je 2002. bila ugrađena nova PVC stolarija te su obnovljena pročelja zgrade i slojevi ravnog krova. Zgrada je prije rekonstrukcije posjedovala energetski certifikat C energetskog razreda, no s obzirom na to da je kvaliteta izvedenih radova bila relativno niska, projektom su predviđeni novi zahvati za sanaciju. Cilj rekonstrukcije objekta bio je podizanje standarda stanovanja u studentskom domu koji je bio neprimjeren današnjem standardu pri čemu se vodila briga i o studentima s invaliditetom i smanjene pokretljivosti kao i o znatnom poboljšanju energetske učinkovitosti same zgrade. Glavni projekt rekonstrukcije izradile su tvrtke BP Consulting d.o.o. (arhitektonski projekt), MHM Inženjering d.o.o. (građevinski projekt), INEL d.o.o. (eletrotehnički projekt) i HRASTOVIĆ Inženjering d.o.o. (projekt strojarskih instalacija).



Slika 1. Studentski dom prije (a) [3] i poslije (b) rekonstrukcije [autor: Mario Miloloža]

## 2. Postojeća zgrada studentskog doma

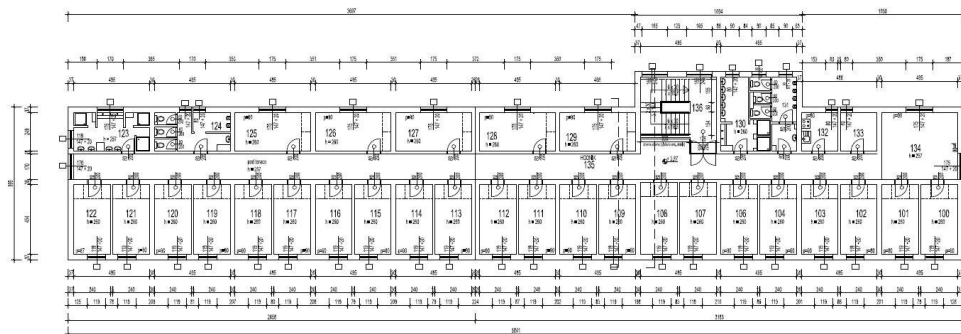
### 2.1. Oblikovanje i konstrukcija

Postojeća zgrada studentskog doma oblikovana je kao pravilan volumen izduženog oblika u omjeru 1:6. Dimenzija je 58.40 m x 9.95 m na užem i 12.12 m na širem dijelu te se sastoji od prizemlja i četiri etaže, ukupne bruto površine 3031.50 m<sup>2</sup> čija je tlocrtna dispozicija približno jednaka. Visina zgrade iznosi 15.67 m od kote uređenog terena. Konstrukciju čine vanjski obodni i poprečni nosivi zidovi na osnom razmaku od 5.25 m. Raster konstrukcije vidljiv je na fasadi (Slika 1, a). Krov zgrade izveden je kao ravni s odvodnjom oborinskih voda prema središnjem dijelu u unutrašnjost zgrade, a pristup krovu omogućen je sa zadnje etaže preko ljestvi i otvora u stropu.

### 2.2. Funkcionalna podjela

Ukupan kapacitet doma bio je 258 ležaja raspoređenih u 127 dvokrevetnih te četiri jednokrevetne sobe. Na svakoj se etaži nalazilo 27 dvokrevetnih soba te po jedna

jednokrevetna (ukupno 55 ležaja), dok je u prizemlju bilo smješteno 19 dvokrevetnih soba (38 ležaja). Postojeća zgrada imala je sanitarne čvorove na sredini i kraju hodnika (muške i ženske) i dnevne boravke na svakoj etaži (Slika 2). Čajne kuhinje bile su organizirane kao predprostor sanitarnog čvora u prizemlju što nije zadovoljavalo suvremene standarde.



**Slika 2.** Tlocrt karakteristične etaže – prvotno stanje [izvor: projektna dokumentacija]

Sve etaže u domu povezuje trokrako stubište u središnjem dijelu zgrade, a svim prostorima pristupa se preko hodnika širine 170 cm. Uz ulaz je bila smještena mala kantina koja je zauzimala površinu 2 rastera konstrukcije, tj. površine dvije studentske sobe na sjevernoj strani zgrade. Njezina pozicija je zadržana te je predviđena zamjena dotrajalih podova, zamjena opreme te uklanjanje staklene stijene koja je bila istaknuta u prostor hodnika. Uz središnji ulazni dio nalazi se toplinska podstanica niže razine od ostatka prizemlja (na koti - 1.28 m) te zauzima površinu jednog rastera konstrukcije. Smještaj postojeće toplinske podstanice je zadržan, no tri sobe u prizemlju, koje su u neposrednoj blizini toplinske podstanice, prenamijenjene su u tehničke prostore (strojarnicu) te zajedničku čajnu kuhinju za studente. Domu se pristupa preko stubišta iz Ulice I.G. Kovačića. Uz sami ulaz nalazila se portirnica čija organizacija nije omogućavala dovoljno dobru preglednost ulaznog prostora. Postojeći ulazni prostor bio je ostakljen staklenom opekom na mjestu portirnice što je onemogućavalo kvalitetnu kontrolu ulaznog prostora kao i nedostatnu energetske učinkovitost stijene. Također, portirnica je bila izložena jakoj insolaciji, a nenatkriveni ulazni prostor različitim atmosferskim utjecajima. Iz tog je razloga predviđena nova nadstrešnica nad ulaznim prostorom i stubištem kako bi se isti nepovoljni uvjeti spriječili.

Svijetla visina karakteristične etaže iznosi 2.60m. Dvokrevetne sobe pojavljuju se u dva tipa približno iste kvadrature, ali drugačijeg položaja u zgradi te organizacije same sobe. TIP A bile su sobe orijentirane na jug, površine 10.90m<sup>2</sup>. Duža strana postavljena je okomito na hodnik, a dimenzije sobe iznose 4.54 m x 2.40 m. TIP B bile su sobe orijentirane na sjever, površine 12.32m<sup>2</sup>. Duža strana paralelna je s glavnim hodnikom, a dimenzije sobe iznose 2.49 m x 4.95 m. U svim sobama smještena su dva kreveta, dva pisaća stola te dva ormara za odjeću. Uočen je nedostatak prostora za pohranu knjiga, odjeće, obuće i namirnica. Jednokrevetne sobe smještene su na svakoj etaži u istočnom krilu zgrade te se sastoje od jednog kreveta, jednog ormara te pisaćeg stola. Površine su 5.97 m<sup>2</sup>.

### 3. Rekonstrukcijski zahvati i novo stanje građevine

#### 3.1. Zahvati na konstrukciji

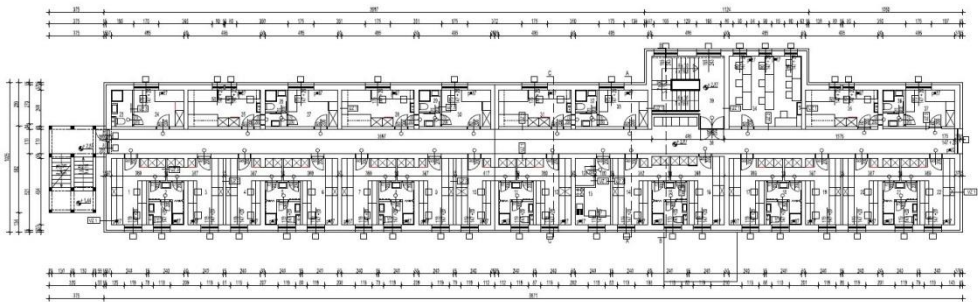
Svi rekonstrukcijski zahvati izvedeni su uz minimalnu intervenciju u nosivu konstrukciju zgrade, a malobrojni zahvati odnosili su se na rušenje pregradnih zidova te proširenje i pomicanje otvora vrata što nije utjecalo na mehaničku otpornost i stabilnost postojećeg objekta niti ugrožavalo sigurnost korisnika zgrade. Kako bi se u podovima objekta u potpunosti izveo novi razvod kanalizacijskog sustava i postavili dodatni slojevi toplinske izolacije, postojeća betonska ploča u prizemlju je uklonjena i zamijenjena novom te je tako visina rekonstruiranog poda s novim slojevima odgovarala visini postojećeg poda zgrade.

Predviđeni su novi zahvati za sanaciju u vidu zamjene prozorskih klupčica, brtvljenja prozora, toplinskih mostova i zamjene fasadne obloge koja je svojom debljinom bila izolacijski nedovoljno učinkovita. Postavljanjem dodatne toplinske izolacije na vanjskoj ovojnici te fotonaponskih ćelija i solarnih kolektora za proizvodnju električne energije i pripremu tople vode na krovu zgrade, ostvarila se značajna ušteda energije uz korištenje obnovljivih izvora energije. Predviđeno je uklanjanje slojeva ravnog krova do nivoa nosive stropne ploče te postavljanje novih slojeva toplinske i hidroizolacije s padom prema sjeveru (izveden je kao blagi jednostrešni krov koji je sakriven s atikom tako da omogućiti odvodnju oborinskih voda izvan objekta). Na slojeve su postavljene staze u vidu betonskih kocki na gumenim odstočnicima kako bi se spriječio proboj hidroizolacijske obloge. Ravni krov iskorišten je za postavljanje fotonaponskih ćelija te smještaj zračne dizalice topline. Pristup ravnom krovu dodatno je omogućen preko novoprojektiranog protupožarnog vanjskog stubišta uz zadržavanje postojećeg otvora iz unutrašnjosti objekta. S obzirom na veću visinu slojeva ravnog krova i smještaj fotonaponskih panela u nagibu, povećana je visina nadozida ravnog krova čime je ukupna visina zgrade doma povišena na 16.04m. Zračna dizalica topline smještena je na proširenom dijelu krova iznad glavnog stubišta te se na taj način stubišni prostor izdiže iznad ravnog krova i naglašen je bojom drugačijom od ostatka pročelja. Pročelje je bijele boje s elementima u crnoj, sivoj i žutoj boji. Naglašeni elementi javljaju se u vidu nadstrešnice ulaza, rampe za invalide te vanjskog protupožarnog stubišta. Nova nadstrešnica oblikovana je kao metalni okvir koji okružuje istaknuti dio stubišta s dvije bočne i gornje strane te je naglašena s jarkom žutom bojom s unutrašnje, a crnom s vanjske strane. Ukupna bruto površina svih etaža zgrade doma nakon poboljšanja energetske učinkovitosti iznosi 3137.60m<sup>2</sup>, dok bruto površina prostorije zračne dizalice topline na krovu zgrade iznosi 61.14 m<sup>2</sup>. Sveukupno to čini površinu od 3198.74 m<sup>2</sup>.



### 3.2. Organizacija prostorija

Rekonstrukcijom objekta na svakoj su etaži smještene čajne kuhinje sa štednjakom, sudoperom, hladnjakom te pultom za jelo. S obzirom na to da se postojeći dnevni boravci na krajevima hodnika na svakoj etaži nisu koristili adekvatno, oni su također prenamijenjeni u studentske sobe, dok se u prizemlju na njihovim mjestima nalazi prostor uprave doma. Novoprojektirano stanje omogućava znatno povećanje kvalitete stanovanja u studentskom domu ponajprije ukidanjem zajedničkih kupaonica te projektiranjem novih koje koriste po dvije susjedne sobe. Kupaonice su podijeljene tako da ih istovremeno mogu koristiti tri studenta. Svaka treća soba na južnoj strani je prenamijenjena u kupaonicu i predprostor s ormarima, dok je na sjevernoj strani svaka druga dvokrevetna soba pretvorena u jednokrevetnu, a ostatak prostora iskorišten je za smještaj kupaonice koju dijele dvije susjedne sobe. Tako je smanjen ukupan broj studenata sa 258 na 193, ali je povećana kvaliteta stanovanja.



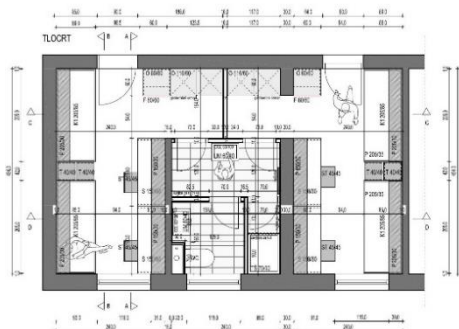
**Slika 3.** Tlocrt karakteristične etaže – novoprojektirano stanje [3]

S obzirom na to da prije rekonstrukcije u domu nisu postojale sobe koje su prilagođene osobama s invaliditetom i smanjene pokretljivosti, podizanje standarda omogućeno je projektiranjem novih soba i kupaonica koje su im prilagođene kao i vanjske prilazne rampe za pristup objektu. Četiri sobe za osobe s invaliditetom smještene su u istočnom krilu prizemlja zgrade. Svaka soba je jednokrevetna, a po dvije susjedne sobe dijele kupaonicu koja je također projektirana sukladno *Pravilniku o osiguranju pristupačnosti građevina osobama s invaliditetom i smanjene pokretljivosti*.

Na mjestu nekadašnjih zajedničkih kupaonica u središnjem dijelu zgrade, u prizemlju se nalazi zajednički prostor praonice i sušionice rublja s energetski učinkovitom opremom te sanitarni čvor za zaposlenike doma, dok je na ostalim etažama taj prostor iskorišten za prostor za učenje i tihu radnu atmosferu (1. i 3. kat) te za trokrevetne sobe s vlastitom kupaonicom (2. i 4. kat). Projektom su u svakoj sobi predviđena dva kreveta, dva pisača stola s pripadajućim stolicama te ormari i police za smještaj potrepština studenata. Također, u svakoj je sobi predviđen hladnjak u sklopu zajedničkog ormara te stolne lampe za osvjetljenje radne površine stola. Između kreveta su smješteni taburei koji se mogu izvući i služiti kao dodatno mjesto za sjedenje ili kao dodatni spremišni prostor. (Slika 3, a i b)

U svim je sobama predviđena zamjena dotrajalih parketa novim podom. S obzirom na relativno malu visinu u koju je moguće postaviti sve potrebne slojeve poda, predviđen je

akustični PVC pod na cementnoj glazuri kako bi se izjednačila visina poda sobe s visinom poda hodnika. U svim je sobama predviđeno grijanje i hlađenje ventilokonvektorima koji su smješteni u ulaznom prostoru sobe iznad ulaznih vrata.



Slika 4. Soba TIP A – novo stanje, nacrt (a) [3], fotografija (b) [autor: Mario Miloloža]

## 4. Zaključak

Ovom rekonstrukcijom podignut je standard življenja u postojećem studentskom domu. Unatoč (i dalje) maloj kvadraturi karakteristične sobe i smanjenju broja studenata, ostvaren je značajan pomak u funkcionalnom, sigurnosnom, energetskom i estetskom smislu. S obzirom na to da budućnost građenja nije samo u projektiranju i stvaranju novih zgrada, ova je rekonstrukcija pozitivan primjer održavanja postojećih zgrada za buduće naraštaje.

## Literatura

- [1] U Osijeku otvoren obnovljeni studentski dom, <http://magazin.hrt.hr/396623/u-osijeku-otvoren-obnovljeni-studentski-dom> 14.07.2017.
- [2] Glavni projekt rekonstrukcije Studentskog doma u Osijeku, svibanj 2015.
- [3] Mapa 1 - Glavni arhitektonski projekt, ZOP:031-15-MHM, oznaka projekta: GL 14/2015-A, svibanj 2015.  
Glavni projektant: Bogdan Paulik, dipl.ing.arh., projektant: Bogdan Paulik, dipl.ing.arh., suradnik: Marija Krajnović, mag. ing. arch.  
Naručitelj: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Studentski centar Osijek, Istarska 5, Osijek.

## STREAM 1D: Numerički model za prognoziranje prodora slane vode u izrazito uslojenim ušćima

Nino Krvavica<sup>1</sup>, Nevenka Ožanić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, {nino.krvavica; nozanic}@uniri.hr

### Sažetak

STREAM 1D je računalni model za prognoziranje hidrodinamičkih procesa u izrazito uslojenim uvjetima. Procesne jednačbe izvedene su iz zakona očuvanja mase i količine gibanja za jednodimenzionalno i nestacionarno tečenje dva sloja plitkih voda različitih gustoća u koritima proizvoljne geometrije. Numerički algoritam implementiran je u *Python* 3.6 programskom jeziku, a temelji se na metodi konačnih volumena, odnosno dobro uravnoteženoj *Roevoj Q-shemi*. Model je detaljno validiran usporedbom s terenskim mjerenjima za slučaj dvoslojnog tečenja na ušću Rječine. U ovome su radu prikazane mogućnosti modela u prognoziranju duljine prodora slane vode uslijed konstantnog protoka rijeke. Uz kalibrirani koeficijent trenja na razdjelnicu među slojevima, poklapanja numeričkih rezultata i izmjerenih vrijednosti su zadovoljavajuća.

*Ključne riječi: ušća, računalni model, jednačba plitkih voda, uslojenost, metoda konačnih volumena, Q-shema, Rječina*

## STREAM 1D: Numerical model for predicting the salt-water intrusion in highly stratified estuaries

### Abstract

STREAM 1D is a computational model for simulating hydrodynamic processes in highly stratified conditions. Governing equations are derived from the conservation laws for mass and linear momentum, for one-dimensional and time-dependent shallow water flow of two-layer of different densities and in channels with irregular geometry. The numerical algorithm is implemented in Python 3.6, and is based on the finite volume method, or more precisely on a well-balanced Q-scheme of Roe. This model was thoroughly validated by comparing the results with field measurements of two-layer flow in the Rječina River Estuary. In this work, we present the model's capability to predict the salt-water intrusion length under constant river flow. When the interfacial friction factor between the layers is calibrated, the agreement between the numerical results and measured values is satisfactory.

*Keywords: estuaries, computational model, shallow water equation, stratification, finite volume method, Q-scheme, Rječina*

## 1. Uvod

**Stratified Estuarine Model** (STREAM 1D) je autorski jednodimenzionalni numerički model koji opisuje dvoslojno i nestacionarno tečenje plitkih voda u uslojenim uvjetima. Model je prije svega razvijen kako bi se mogli prognozirati kompleksni hidrodinamički procesi u izrazito stratificiranim ušćima, pri čemu se ponajprije misli na prodiranje slane vode uslijed različitih hidroloških i mareografskih utjecaja, ali i na propagaciju poplavnih valova u priobalnim zonama uslijed međudjelovanja ekstremnih oborina i olujnih uspora s mora. Naime, u uvjetima malih amplituda morskih mijena te uz dominantan utjecaj riječnog toka (što je slučaj u većini rijeka Mediteranskog sliva, uključujući i Jadranski sliv), na ušćima rijeka uspostavlja se izrazito uslojeno tečenje; gornji sloj slatke vode teče prema ušću iznad donjeg sloja slane vode koji prodire uzvodno. U ovakvim uvjetima granica između dva sloja je vrlo oštra, a donji sloj poprima oblik klina (od tuda i drugi naziv za ovaj tip ušća – „slani klin“).

Iako su danas sve dostupniji 3D numerički modeli koji rješavaju *Navier-Stokesovu* jednadžbu (primjerice OpenFOAM), za opisivanje uslojenog tečenja na ušćima rijeka potrebno je koristiti dvofazne sheme te dinamičko prognošćivanje mreže u blizini razdjelnice slojeva, što zahtijeva izrazito snažne računalne resurse (super računala) ili pak rezultira vrlo dugotrajnim proračunima. S druge strane, modeli plitkih voda su puno jednostavniji za implementirati, računalno su manje zahtjevni, a mogu se proširiti na dva međusobno povezana sloja te tako dovoljno precizno opisati fizikalne procese u uslojenim uvjetima toka [1]. Dvoslojni modeli plitkih voda uspješno su primijenjeni i detaljno validirani na različitim primjerima uslojenog tečenja, kao što su izmjene dvaju mora kroz tjesnace [1,2], gravitacijske struje [3] te izrazito stratificirana ušća [4,5].

U ovome će se radu ukratko opisati procesne jednadžbe modela, glavni aspekti numeričke implementacije te prikazati mogućnosti modela u prognoziranju prodora slane vode na ušću Rječine uz validaciju s terenskim mjerenjima.

## 2. Matematički model i numerička shema

### 2.1. Matematički model

Matematički model definiran je sustavom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi izvedenih iz zakona očuvanja mase i količine gibanja za jednodimenzionalno tečenje dva sloja plitkih voda različitih gustoća u koritima proizvoljne geometrije. Ovaj je sustav zapisan u sljedećem vektorskom obliku [4,6]:

$$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w})}{\partial x} = \mathbf{B}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}) \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial x} + \mathbf{v}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}) + \mathbf{s}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}), \quad (1)$$

gdje je  $t$  vrijeme,  $x$  koordinata u smjeru toka, vektor nepoznanica je  $\mathbf{w} = \{A_1 \ Q_1 \ A_2 \ Q_2\}^T$ , a vektor numeričkog fluxa  $\mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w})$  definiran je izrazom [2]

$$\mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}) = \left\{ Q_1 \ \frac{Q_1^2}{A_1} + \frac{g}{2\sigma_1} A_1^2 \ \ Q_2 \ \frac{Q_2^2}{A_2} + \frac{g}{2\sigma_2} A_2^2 \right\}^T \quad (2)$$

gdje je  $A_i$  omočena površina poprečnog presjeka,  $Q_i$  protok,  $g$  ubrzanje sile teže,  $\sigma_i$  širina poprečnog presjeka, a indeks  $i = 1, 2$  označava gornji, odnosno donji sloj. Uz navedeno, matrica  $\mathbf{B}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w})$  i vektor  $\mathbf{v}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w})$  definirani su sljedećim izrazima [2]:

$$\mathbf{B}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g \frac{A_1}{\sigma_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g \frac{A_2}{\sigma_1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\sigma_1} \right) A_1^2 \\ 0 \\ \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\sigma_2} \right) A_2^2 \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Izvorni članovi  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w})$  i  $\mathbf{s}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w})$  opisuju geometrijske karakteristike korita te fizikalne procese na razdjelnici među slojevima (trenje i vertikalno miješanje) [4,6]:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \frac{gA_1}{\sigma_1} (I_{3,1} + I_{3,2}) \\ 0 \\ \frac{rgA_2}{\sigma_1} I_{3,1} + \frac{gA_2}{\sigma_2} I_{3,1} \end{array} \right\}, \quad \mathbf{s}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \frac{\tau_w}{\rho_1} O_1 + \frac{\tau_i}{\rho_1} \sigma_3 \\ 0 \\ \frac{\tau_b}{\rho_2} O_2 - \frac{\tau_i}{\rho_2} \sigma_3 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \sigma_3 w_e \\ \sigma_3 \frac{Q_1}{A_1} w_e \\ -\sigma_3 w_e \\ -\sigma_3 \frac{Q_2}{A_2} w_e \end{array} \right\} \quad (4)$$

gdje su  $I_{3,1}$  i  $I_{3,1}$  integrali koji opisuju proizvoljnu geometriju korita,  $r$  je omjer gustoće gornjeg i donjeg sloja,  $\tau_b$ ,  $\tau_w$  i  $\tau_i$  su posmična naprezanja između, redom, fluida i dna kanala, fluida i bočnih stranica te dvaju fluida,  $O_i$  je omočeni obod, a  $w_e$  je vertikalna brzina transporta vode (eng. *entrainment velocity*) iz donjeg sloja u gornji. Trenje i miješanje na razdjelnici uključeni su ne samo kako bi realnije opisali fizikalne procese, već kako bi numerička shema bila stabilnija i robusnija [7]. Više detalja o procesnim jednadžbama dostupno je u literaturi [4].

## 2.2. Numerička implementacija modela

Sustav jednadžbi (1) rješava se pomoću metode konačnih volumena (MKV). U tu svrhu razvijen je numerički algoritam napisan u *Python* 3.6 programskom jeziku u koji je implementirana dobro uravnotežena *Roeva Q-shema*. Navedena numerička shema je *up-wind* aproksimativni postupak rješavanja, koji se pokazao kao vrlo točan i robusan kada se primijeni na rješavanje problema nestacionarnog tečenja plitkih voda [1]. Ova numerička shema je eksplicitna, drugog je reda točnosti za stacionarna rješenja te dopušta prijelaze između mirnog i burnog režima tečenja [1].

Prostorna domena je podijeljena u kontrolne ćelije (volumene) definirane širinom  $\Delta x$ . Pritom je vremenski korak označen sa  $\Delta t$ . Indeks  $i$  označava prostorni položaj, dok eksponent  $n$  označava vremenski korak. Jednadžba (1) je tako aproksimirana sljedećim izrazom [2,4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_i^{n+1} = & \mathbf{w}_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{f}_{i-1/2} - \mathbf{f}_{i+1/2}) \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta x} [\mathbf{B}_{i-1/2}(\mathbf{w}_i^n - \mathbf{w}_{i-1}^n) + \mathbf{B}_{i+1/2}(\mathbf{w}_{i+1}^n - \mathbf{w}_i^n)] \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\mathbf{v}_{i-1/2} + \mathbf{v}_{i+1/2}) + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{P}_{i-1/2}^+ \mathbf{g}_{i-1/2} + \mathbf{P}_{i+1/2}^- \mathbf{g}_{i+1/2}) \\ & + \Delta t (\mathbf{P}_{i-1/2}^+ \mathbf{s}_{i-1/2} + \mathbf{P}_{i+1/2}^- \mathbf{s}_{i+1/2}) \end{aligned} \quad (5)$$

gdje su numerički fluksevi definirani sljedećim izrazom [2]:

$$\mathbf{f}_{i-1/2} = \frac{1}{2} [\mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}_{i-1}^n, \mathbf{w}_{i-1}^n) + \mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}_i^n, \mathbf{w}_i^n)] - \frac{1}{2} |\mathcal{Q}_{i-1/2}| (\mathbf{w}_i^n - \mathbf{w}_{i-1}^n), \quad (6)$$

$$\mathbf{f}_{i+1/2} = \frac{1}{2} [\mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}_i^n, \mathbf{w}_i^n) + \mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}_{i+1}^n, \mathbf{w}_{i+1}^n)] - \frac{1}{2} |\mathcal{Q}_{i+1/2}| (\mathbf{w}_{i+1}^n - \mathbf{w}_i^n) \quad (7)$$

gdje je matrica  $\mathcal{Q}_{i+1/2} = \mathbf{J}_{i+1/2} - \mathbf{B}_{i+1/2}$  razlika Jakobijane fluksa  $\mathbf{J} = \partial \mathbf{f} / \partial t$  i matrice  $\mathbf{B}$  definirane na granici  $i + 1/2$  između ćelija, a viskozna matrica  $|\mathcal{Q}_{i+1/2}|$  je definirana spektralnom dekompozicijom  $|\mathcal{Q}_{i+1/2}| = \mathbf{K}_{i+1/2} |\boldsymbol{\Lambda}_{i+1/2}| \mathbf{K}_{i+1/2}^{-1}$ , pri čemu je  $|\boldsymbol{\Lambda}_{i+1/2}|$  dijagonalna matrica čiji su koeficijenti apsolutne vlastite vrijednosti matrice  $\mathcal{Q}_{i+1/2}$ ,  $\mathbf{K}_{i+1/2}$  je matrica pripadajućih vlastitih vektora, a  $\mathbf{K}_{i+1/2}^{-1}$  je inverzna matrica matrice vlastitih vektora. Kako bi se osigurala dobra uravnoteženost sheme uslijed diskontinuiteta na dnu, izvorni su članovi aproksimirani *up-wind* postupkom pomoću projekcijskih matrica, definiranih sljedećim izrazima [2]:

$$\mathbf{P}_{i-1/2}^{\pm} = \frac{1}{2} \mathbf{K}_{i-1/2} (\mathbf{I} \pm \text{sign}(\boldsymbol{\Lambda}_{i-1/2})) \mathbf{K}_{i-1/2}^{-1}, \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{i+1/2}^{\pm} = \frac{1}{2} \mathbf{K}_{i+1/2} (\mathbf{I} \pm \text{sign}(\boldsymbol{\Lambda}_{i+1/2})) \mathbf{K}_{i+1/2}^{-1}. \quad (9)$$

Za preostale detalje implementacije ovog numeričkog algoritma čitatelji se upućuju na literaturu [4].

### 2.3. Rubni uvjeti

Nizvodni rubni uvjet zahtijeva posebnu pažnju u slučaju dvoslojnog tečenja u izrazito stratificiranim ušćima. Naime nizvodni rub domene je potrebno postaviti na mjestu utoka rijeke u more, gdje dolazi do naglog širenja korita, a tečenje tada prelazi iz mirnog u burni režim. U skladu s time dubina razdjelnice definirana je uvjetom kritičnog tečenja [2,4]:

$$F_1^2 + F_2^2 - (1-r) \frac{\sigma_2}{\sigma_3} F_1^2 F_2^2 = 1 \quad (10)$$

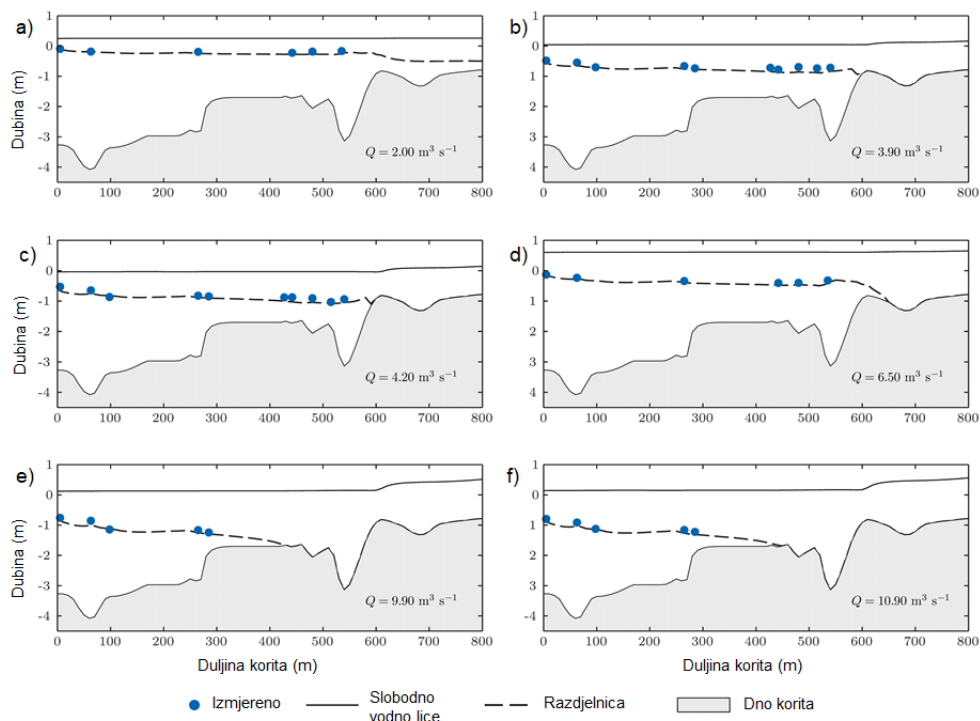
gdje su  $F_1^2 = \frac{Q_1^2 \sigma_1}{g(1-r) A_1^3 \sigma_2}$  i  $F_2^2 = \frac{Q_2^2 \sigma_3}{g(1-r) A_2^3}$  kvadrati denzimetrijskog Froudovog broja gornjeg i donjeg sloja. Rubni uvjet se u svakom vremenskom koraku rješava iterativno dok pretpostavljene vrijednosti nepoznanica  $A_1, A_2, Q_1$  i  $Q_2$  ne zadovolje izraz (10).

### 3. Rezultati

Kako bi se prikazale mogućnosti STREAM-1D modela u prognožiranju duljine prodora i oblika slanog klina uslijed konstantnog protoka rijeke, provedeno je nekoliko simulacija dvoslojnog tečenja na ušću Rječine za različite hidrološke i mareografske uvjete. Promatralo se korito Rječine u duljini od 800 m od ušća u Jadransko more. Geometrija korita Rječine definirana je poprečnim presjecima iz kojih su onda definirane funkcije dubine dna kanala te širine i površine poprečnog presjeka. Domena je ukupne duljine 800 m, a aproksimirana je sa 80 ćelija duljine  $\Delta x = 10,0$  m. Vremenski korak odabran je pomoću vrijednosti  $\Delta t = 1,0$  s, kako bi se osigurao uvjet  $\text{CFL} \leq 0,9$  gdje je CFL *Courant-Friedrichs-Lewy* broj koji mora biti manji od 1 kako bi eksplicitna shema bila stabilna. Proračun je trajao dok se nisu postigli stacionarni uvjeti. Koeficijent trenja te vertikalna brzina transporta vode odabrani su iz empirijskih izraza dobivenih prethodnom kalibracijom modela na ušću Rječine [8].

Rubni uvjeti zadani su s obzirom na izmjerene vrijednosti protoka Rječine i razine mora na ušću za svaki slučaj zasebno. Uzvodni rubni uvjet definiran je konstantnim protokom  $Q_1(t, 800)$ , dok je nizvodni rubni uvjet definiran konstantnom razinom mora  $H(t, 0) = h_1(t, 0) + h_2(t, 0)$  te kritičnom dubinom razdjelnice  $h_1(t, 0)$  prema izrazu (10). Početni uvjet zadan je na sljedeći način: protok u donjem sloju jednak je nuli duž cijele domene  $Q_2(0, x) = 0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , protok u gornjem sloju jednak vrijednosti uzvodnog rubnog uvjeta  $Q_1(0, x) = Q_1(t, 800)$ , ukupna razina vode jednaka je izmjerenoj razini mora  $H(0, x) = RM$ , a debljina gornjeg sloja jednaka je kritičnoj dubini definiranoj izrazom (10).

Na Slici 1 prikazani su rezultati proračuna za različite protoke Rječine te razine mora; uzdužni profil razdjelnice između gornjeg i donjeg sloja uspoređen je s izmjerenim dubinama razdjelnice na više lokacija duž korita. Razvidno je kako duljina slanog klina kao i debljina gornjeg sloja ponajviše ovise o protoku Rijeke. Primjerice, najdulji slani klin zabilježen je i prognozirani za najniži protok od  $2,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Slika 1a), dok je za  $10,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  izračunat najkraći slani klin (Slika 1f). Pritom i razina mora ima određenog utjecaja, pa je tako veća duljina slanog klina zabilježena kod protoka  $6,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Slika 1d) u odnosu na protok  $4,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ponajprije zbog više razine mora. Ukupno gledajući, izmjereni se rezultati zadovoljavajuće poklapaju s izmjerenim vrijednostima za iste rubne uvjete.



**Slika 1.** Usporedba numeričkih rezultata i izmjerenih vrijednosti dubine razdjelnice među slojevima za različite hidrološke i mareografske uvjete [4]

## 4. Zaključak

U ovome je radu ukratko predstavljen matematički model, glavni aspekti implementacije numeričkog algoritma te dio mogućnosti modela STREAM 1D. Na nekoliko je primjera prikazano kako model uspješno može prognozirati duljinu i oblik slanog klina uslijed konstantnog protoka Rijeke na primjeru ušća Rječine. Međutim treba napomenuti da je za ovako dobro poklapanje potrebno kalibrirati koeficijent trenja na razdjelnici za koje, nažalost, još uvijek ne postoje dovoljno pouzdani empirijski izrazi [4,8]. U budućnosti se planira navedeni model proširiti za dvodimenzionalne probleme te uključiti treći međusloj kako bi se preciznije opisali izrazito dinamički i turbulentni procesi na razdjelnici slojeva pri različitim scenarijima tečenja u stratificiranim ušćima.

## Zahvala

Zahvaljujemo Sveučilištu u Rijeci koje je financiralo ovaj rad projektom broj 17.06.2.1.02 (*Međudjelovanje mora i rijeka u kontekstu klimatskih promjena*).

## Literatura

- [1] Castro, M., Macías, J. and Parés, C.: A Q-scheme for a class of systems of coupled conservation laws with source term. Application to a two-layer 1-D shallow water system. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 35(1), pp.107-127, 2001.
- [2] Castro, M.J., Garcia-Rodriguez, J.A., González-Vida, J.M., Macias, J., Parés, C. and Vázquez-Cendón, M.E.: Numerical simulation of two-layer shallow water flows through channels with irregular geometry. *Journal of Computational Physics*, 195(1), pp.202-235, 2004.
- [3] Adduce, C., Sciortino, G. and Proietti, S.: Gravity currents produced by lock exchanges: experiments and simulations with a two-layer shallow-water model with entrainment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), pp.111-121, 2011.
- [4] Krvavica, N.: One-dimensional numerical model for layered shallow water flow in highly stratified estuaries, doktorski rad Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.25017.98400
- [5] Krvavica, N., Kožar, I., Travaš, V., Ožanić, N.: Numerical modelling of two-layer shallow water flow in microtidal salt-wedge estuaries: Finite volume solver and field validation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 65(1) , pp. 49-59, 2017, doi: 10.1515/johh-2016-0039
- [6] Krvavica, N., Travaš, V., Ožanić, N.: Salt-Wedge Response to Variable River Flow and Sea-Level Rise in the Microtidal Rječina River Estuary, Croatia. *Journal of Coastal Research*. 33(4) , pp. 802-814, 2017, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00053.1
- [7] Krvavica, N., Kožar, I., Ožanić, N.: The relevance of turbulent mixing in estuarine numerical models for two-layer shallow water flow. *Coupled Systems Mechanics*. 7(1) , pp. 95-10, 2018, doi: 10.12989/csm.2018.7.1.095
- [8] Krvavica, N., Travaš, V., Ožanić, N.: A field study of interfacial friction and entrainment in a microtidal salt-wedge estuary. *Environmental Fluid Mechanics*. 16(6) , pp. 1223-1246, 2016, doi: 10.1007/s10652-016-9480-1



## Dynamic assignment of loading bays for efficient urban last mile deliveries

Tomislav Letnik<sup>1</sup>, Matej Mencinger<sup>1</sup>, Stane Božičnik<sup>1</sup>

(1) University of Maribor, Faculty of Civil Engineering, Transportation Engineering and Architecture, Slovenia, {tomislav.letnik; matej.mencinger; stane.bozicnik}@um.si

### Abstract

Urban freight deliveries are facing problems of limited accessibility to customers located in the city centre. Due to lack of loading bays, freight vehicles are forced to double parking or circulating in the city centre to find an available loading bay. To solve that problem a model for dynamic management of urban last mile deliveries has been developed. The optimisation is based on fuzzy c-means clustering of customers to dynamically assign the best possible loading bay in combination with a two-echelon routing algorithm. The model is tested on the actual data of deliveries to the historical city centre of Lucca, Italy. Results of simulations have proven significant savings of the total travel time and distance in comparison to the existing situation. The suggested approach is highly flexible and allows adaptation to any city access restriction scheme.

*Keywords: city logistics, facility location, vehicle routing, optimisation*

## Dinamičko dodjeljivanje slobodnih mjesta vozilima za učinkovitu dostavu do vrata

### Sažetak

Dostava teretnim vozilima u urbanim sredinama, a posebno u centre gradova, je otežano ograničenim pristupom korisnicima usluga dostave. Zbog manjka područja za utovar, dostavna se vozila parkiraju na nedozvoljenim područjima ili cirkuliraju dok ne nađu slobodno mjesto. U ovom je radu predstavljeno rješenje tog problema pomoću modela za dinamičko upravljanje dostave do vrata (*last mile delivery*). Optimizacija u modelu izvedena je preko algoritma c-sredina (*fuzzy c-means clustering*) koji dinamički pridjeljuje svakog korisnika na najbolje dostupno područje za utovar u kombinaciji s algoritmom za navođenje u dvije razine. Model je testiran sa stvarnim podacima o dostavama u centru grada Lucca u Italiji. Rezultati simulacija upućuju na značajnu uštedu ukupnog vremena dostave u odnosu na trenutačno stanje. Opisani pristup je izrazito fleksibilan i dopušta uvođenje dodatnih prometno ograničavajućih shema.

*Ključne riječi: gradska logistika, položaj usluge, navođenje vozila, optimizacija*

## **1. Introduction**

Increasing demand of customers and constant growth of urban areas are fundamentally changing conditions and possibilities for efficient urban freight deliveries. New trends of just-in-time deliveries and e-commerce result in high fragmentation of urban freight delivery demand, which increases the number of poorly utilised urban freight transport trips and decreases the efficiency of urban freight deliveries. Recent empirical studies estimate that urban freight vehicles account for 6 to 18 percent of a total number of vehicles in cities; 10 to 15 percent of vehicle-kilometres and about 20 percent of energy use and CO<sub>2</sub> emissions [1,2]. Freight vehicles also contribute significantly to urban traffic congestion; they cause a reduction of available road capacity and contribute significantly to urban traffic pollution [3]. In Europe, more than 20 percent of distribution vehicles in urban areas drive empty and the average load factor is only at about 30-40 percent [4,5].

These problems are most severe in city centres, and many cities are therefore implementing access restriction schemes to limit traffic congestion in the city centres [6]. Part or the entire city centre is often categorized as a pedestrian zone, which additionally limits the accessibility of freight vehicles to customers located in the city centre. In case customers are not accessible by freight delivery vehicles, loading bays (LBs) are needed for transshipment of parcels and parking of delivery vehicles near customers (mainly on the border of pedestrian zone) for the time being of last mile delivery operations. Last mile delivery is predominantly done on foot or by trolley [7].

Urban areas are in general confronted with scattered LBs and many of them are often occupied (sometimes by other delivery vehicles, but in most cases illegally from individual users) [8,9]. Delivery vehicles which are not able to find available LB are forced to double parking or cruising for parking, which is time-consuming and contributes significantly to the reduction of available road capacity and urban traffic congestion [10–13].

This article is dealing with the problem of defining the most optimal number and location of LBs in urban areas, their selection, considering dynamically changing access restrictions, and optimal vehicle routing for efficient urban last mile deliveries. The first part of the article is dedicated to reviewing of the urban freight LB solutions and initiatives, following by presentation of an algorithm for dynamic management of urban freight deliveries. The final section is devoted to proving efficiency of the proposed approach referring to simulation on the real case study data.

## **2. Review of urban loading bay solutions and initiatives**

LBs should be understood as places within the urban area, where the delivery vehicles can stop to perform parking, transshipment and last mile delivery operations [14]. Initiatives referring to LBs should not be considered only as infrastructure (physical) measures but also as soft measures dealing with management, reservation, and enforcement of loading bays use [14,15].

Delivery area management approaches have been extensively studied by Patier et al. [12] highlighting the importance of providing the most appropriate in-the-field information system

(or device) to inform all users of the situation (occupancy) of each loading bay. McLeod and Cherrett [16] investigated the impact of advanced booking of LBs and noticed the high level of sensitivity to early or late arrivals. In this case the capacities of LBs may be reduced significantly. Therefore, they suggest opting for more dynamic LB reservation systems.

Different LB management solutions have been recently tested in European cities. Lyon was involved in an experiment called “loading bay of the future” that allowed operators to reserve the space 24 hours in advance. This, in turn, led to more efficient trips and routes in the city and resulted in 40% reduction in double parking for deliveries, less congestion, and pollution in the city centre [8]. Vienna experimented with the project “i-Ladezone” aiming to address intelligent monitoring of LBs in an urban environment. The project developed different management methods for efficient and effective monitoring of the occupancy of LBs by delivery vehicles and private cars and trying to keep LBs at maximum availability to reduce impacts on traffic caused by the loading activities [17]. Lisbon, within the frame of Straightsol project, tested two technological based schemes; adopting parking meters for loading/unloading operations and loop vehicle detection sensors installed on the ground of LBs. They are expecting to reduce the number of parking infractions, reduce the average duration of freight operations, and increase transport operators' and shopkeepers' satisfaction [18].

All above-mentioned examples noted the need for further research and testing towards dynamic LB management, reservation, and implementation of remote monitoring technology for LB control. This process should be additionally supported by the efficient information system that enables also real-time vehicle routing and navigation.

### **3. On algorithm for dynamic management of urban freight deliveries**

A new algorithm and model are developed to overcome problems and needs for better management of LBs identified in the literature and in the above-presented case studies. The algorithm is shortly presented in the sequel (see Figure 1). A more detailed elaboration and explanation of the algorithm and model developed in MATLAB can be found in Letnik et al. [7].

Generally, last mile delivery problem is divided into two sub-problems: (1) the delivery of goods from outside the city to the LB; and (2) the delivery of goods from the LB to the customer. This is the so called “two echelon problem”. In the model both sub-problems are resolved in a reversed order.

(1) In the first sub-problem the best LB is determined with a fuzzy clustering algorithm (FCM), which considers the space continuum, yielding each point of the space as a potential final position of a LB. Considering the practical constraint to make only a limited number of specific locations as potential LB, cluster centres (resulting from the clustering algorithm) must be approximated to the most appropriate (acceptable) location/s which are physically available.

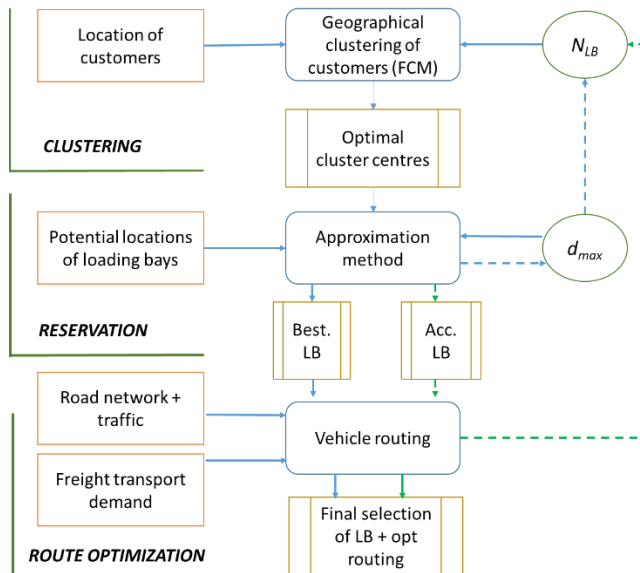
Two different approximation methods are considered. In the first approximation method, only the best potential LB (the closest to the cluster centre) is considered as acceptable. The LB is considered as acceptable for a customer if the walking distance from the LB to the

customer does not exceed some (fixed chosen) distance ( $d_{max}$ ). In the second approximation method, a set of acceptable LBs are taken into consideration.

The aim of the second approximation method is to make the system more flexible, especially in the peak periods when the demand is bigger than the LBs capacities. For this purpose, Fuzzy c-means (FCM) procedure has been implemented because it permits the overlapping of clusters and more flexible selection of LBs. The clustering procedure is searching for a maximum acceptable (walking) distance from the LB to the customer. Clustering is successful if distances from cluster centre to all members of the cluster are all equal or less than  $d_{max}$ .

(2) In the second sub-problem we take advantage of the results obtained when solving the first sub-problem. Selection of the LB depends on the strategy of choosing the approximation method. In the case of the first approximation method, the nearest LB is selected and considered as the most optimal one. In the case of the second approximate method, the algorithm chooses among all the acceptable LBs considering their occupation and the shortest possible path.

The routing is in both cases performed based on the Dijkstra algorithm. The routing algorithm compares travel distances among origins (entrance points to the urban area) and destinations (acceptable LBs). The most optimal (shortest/fastest) route is finally selected in combination with best or acceptable LBs. Routing algorithm also has a function of keeping vehicles outside the city in the case and until all acceptable LBs are occupied.



**Figure 1.** The Architecture of the proposed algorithm

As seen from Figure 1, location of customers (geographical coordinates) and a predefined number of LBs ( $N_{LB}$ ) are two main elements needed for clustering procedure and defining

the optimal location of LBs (cluster centres). In the model,  $N_{LB}$  is determined based on the maximum allowed distance from the LBs to the assigned customers ( $d_{max}$ ).

The best LBs produced by the first approximation method and the acceptable LBs produced by the second approximation method are determined according to the potential location of LBs and the value of  $d_{max}$ . If approximation methods do not result with finding a LB for all customers, then the  $d_{max}$  is increased and clustering algorithm runs again. The procedure is repeating until all the customers are belonging to at least one (acceptable) LB.

When decided on the scenario of the acceptable LBs, vehicle routing aims to find the shortest possible path from outside the city to the LB acceptable for a particular customer. The routing algorithm considers road network and traffic conditions relevant for a particular period of the day. At the end of the procedure, the routing algorithm determines which of the acceptable LBs results with the shortest and fastest path and select this LB as optimal.

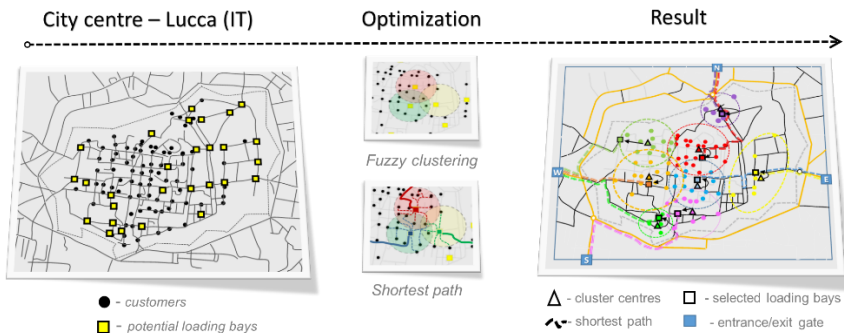
#### **4. Application of the model to a real case**

The model has been applied to a real case study of a historical city centre of Lucca in Italy. The city of Lucca is one of the most advanced historical cities referring to the application of city logistics policies and measures. Consequently, many data have been available, and this presents a good basis for modelling purposes and testing of the proposed model. In addition to that, city of Lucca is planning to establish LBs in city centre, therefore, additional research on the field is needed.

Lucca city centre is a flat oval area, with the diameters of around 1.8 and 1.0 km. Access to the city centre is restricted with Limited Traffic Zone (LTZ) and differs with different time periods of the day. The number of commercial activities in Lucca city centre is 1.161, the average number of daily deliveries is 1272, and the number of commercial vehicles entering in the city centre is 1058 [DIB 08]. These numbers result in around 1.2 deliveries performed by each vehicle. In the model, we, therefore, assume that each freight vehicle performs only one stop in the historical city centre of Lucca.

Most of the deliveries are performed in the following three periods of the day: early morning (from 8 to 10 a.m.) 26.9%, late morning (from 10 to 12 a.m.) 29.1% and afternoon (from 4 to 6 p.m.) 15.7% [19]. We have decided to simulate only these three periods also because in these periods different access restrictions apply, which also results in the availability of a different number of LBs (some locations of loading bays are not accessible during particular periods of the day). These characteristics have been used to simulate dynamically changing conditions for urban freight deliveries.

The modelling and optimization process leading to results of optimal LBs assignment and routing can be best presented with the following scheme (Figure 2).



**Figure 2.** Schematic presentation of the model application

In the first phase, three different directed weighted graphs embedded in the plane have been established in MATLAB to simulate a road network of the city of Lucca. Weights correspond to distances and/or time required for traversing each section of the road network. Weights differ depending on the amount of traffic and pedestrian flows characteristic for different periods of the day.

In the second phase, we identified all customers located in the city centre and discretized their positions to the road sections of 100m. A number of deliveries to specific locations depend upon the number of customers belonging to particular road sections. Number, location, and capacity of potential LBs have been selected based on real physical constraints within the city centre and accessibility of locations with urban freight vehicles.

As already described, optimization has been performed with fuzzy clustering (FCM) of customers and two approximation methods for assigning cluster members to acceptable LBs. This procedure was done in combination with the shortest path algorithm that determined not only the shortest route within the city centre but also a selection of the best possible entrance gate for each individual delivery.

#### 4.1. Achieved results

Performance of the system is compared: for the existing scenario (present situation) and two approximation methods (management strategies) and for the morning (8-10 a.m.), late morning (10-12 a.m.) and afternoon (4 – 6 p.m.) scenario.

**Table 1.** Comparison of performances - existing scenario and two management strategies

PERFORMANCE		Existing scenario			1st mng. strategy			2nd mng. strategy		
		Early morning	Late morning	Afternoon	Early morning	Late morning	Afternoon	Early morning	Late morning	Afternoon
Max travel time	min/trip	51.0	51.0	80.0	30.0	23.0	31.0	30.0	23.0	31.0
Avg. travel time	min/trip	23.4	23.2	37.0	17.0	15.6	20.7	15.4	14.5	18.6
Max distance	km/trip	17.0	15.9	15.3	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
Avg distance	km/trip	9.6	9.5	9.5	6.1	5.9	6.1	5.6	5.5	5.5

As seen in Table 1, the most significant decrease, in commercial vehicles travel times, is shown in the afternoon scenario, when also the highest pedestrian flows are registered. The average travel time decreased from 37 to 20.7 minutes (44%), when the first management strategy is applied, and to 18.6 minutes (50%) when the second management strategy is applied; while the maximum travel time decreased from 80 to 31 minutes (61%) in both cases.

A better performance of the system is evident also from the travel distance point of view. Actually, the average distances decrease from 9.5 km to 6 km (36%), when the first management strategy is applied, and to 5.5 km (42%) in case of the second management strategy. The maximum distance travelled by freight vehicles, equal to 17 km, is shown in the early morning period of the existing scenario: but it decreases to 10.6 km when the two management strategies are applied.

In addition to that, two compared management strategies are resulting with different performance in walking distances of deliverer (from LBs to customers) and waiting time of delivery vehicles before entering the city centre. In the case of the first approximation method (only the best LB - the closest to the cluster centre is selected): average walking distances are only at about 70 meters, but vehicles have to wait outside the city centre for approximately 30 minutes on average. If the second approximation method is used (the algorithm chooses among all the acceptable loading bays – not only the closest one): the average walking distance is around 300 meters, but vehicles almost never wait outside the city before performing the deliveries. For the more detailed description of the model and results please see [7].

## **5. Conclusions**

The last mile freight delivery system for urban areas, and a model to optimise its performances have been developed and presented. The model is centred on a clustering algorithm and two approximation methods to dynamically select the best possible LB and the most optimal routing for efficient urban last mile deliveries. The proposed model has been tested on the case of the small historical city centre and provide considerable savings in travel time and travelled distances.

## **References**

- [1] Schoemaker, J., Allen, J., Huschenbeck, M., Monigl, J.: Quantification of Urban Freight Transport Effects. BESTUFS Project: 2006.
- [2] Figliozzi, MA.: The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics and costs. *Transp Res Part E Logist Transp Rev* 2010;46:496–506. doi:10.1016/J.TRE.2009.04.005.
- [3] Russo, F., Comi, A.: City Characteristics and Urban Goods Movements: A Way to Environmental Transportation System in a Sustainable City. *Procedia - Soc Behav Sci* 2012;39:61–73. doi:10.1016/j.sbspro.2012.03.091.
- [4] Domínguez, A., Holguín-Veras, J., Ibeas, Á., dell'Olio, L.: Receivers' Response to New Urban Freight Policies. *Procedia - Soc Behav Sci* 2012;54:886–96. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.804.

- [5] Bozzo, R., Conca, A., Marangon, F.: Decision Support System for City Logistics: Literature Review, and Guidelines for an Ex-ante Model. *Transp Res Procedia* 2014;3:518–27. doi:10.1016/j.trpro.2014.10.033.
- [6] Bontempo, AP., Cunha, CB., Botter, DA., Yoshizaki, HTY.: Evaluating Restrictions on the Circulation of Freight Vehicles in Brazilian Cities. *Procedia - Soc Behav Sci* 2014;125:275–83. doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.1473.
- [7] Letnik, T., Farina, A., Mencinger, M., Lupi, M., Božičnik S.: Dynamic management of loading bays for energy efficient urban freight deliveries. *Energy* 2018;159:916–28. doi:10.1016/J.ENERGY.2018.06.125.
- [8] Browne, M., Allen, J., Nemoto, T., Patier, D., Visser, J.: Reducing Social and Environmental Impacts of Urban Freight Transport: A Review of Some Major Cities. *Procedia - Soc Behav Sci* 2012;39:19–33. doi:10.1016/j.sbspro.2012.03.088.
- [9] Muñuzuri, J., Cuberos, M., Abaurrea, F., Escudero, A.: Improving the design of urban loading zone systems. *J Transp Geogr* 2017;59:1–13. doi:10.1016/j.jtrangeo.2017.01.004.
- [10] Silva, J., Alho, A.: Using Structural Equations Modelling to explore perceived urban freight deliveries parking issues. *Urbe* 2015 2015:1–20.
- [11] Alho, A., Silva, J., Sousa, JP de.: A State-of-the-Art Modeling Framework to Improve Congestion by Changing the Configuration/Enforcement of Urban Logistics Loading/Unloading Bays. *Procedia - Soc Behav Sci* 2014;111:360–9. doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.069.
- [12] Patier, D., David, B., Chalon R., Deslandres, V.: A New Concept for Urban Logistics Delivery Area Booking. *Procedia - Soc Behav Sci* 2014;125:99–110. doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.1459.
- [13] Gardrat, M., Serouge M.: Modeling Delivery Spaces Schemes: Is the Space Properly used in Cities Regarding Delivery Practices? *Transp Res Procedia* 2016;12:436–49. doi:10.1016/j.trpro.2016.02.077.
- [14] Alho, AR., Silva, J.: Analyzing the relation between land-use/urban freight operations and the need for dedicated infrastructure/enforcement — Application to the city of Lisbon. *Res Transp Bus Manag* 2014;11:85–97. doi:10.1016/j.rtbm.2014.05.002.
- [15] Janjevic, M., Ndiaye, AB.: Which lines of action for local authorities to decrease the environmental impact of the urban freight transport? *Wctr* 2013.
- [16] McLeod, F., Cherrett, T.: Loading bay booking and control for urban freight. *Int J Logist Res Appl* 2011;14:385–97. doi:10.1080/13675567.2011.641525.
- [17] Chloupek, A.: i-Ladezone: Intelligent monitoring of loading bays in Vienna. *Bestfact* 2013.
- [18] Cherrett T., Allen J., McLeod F., Maynard S., Hickford A., Browne M.: Understanding urban freight activity – key issues for freight planning. *J Transp Geogr* 2012;24:22–32. doi:10.1016/J.JTRANGEO.2012.05.008.
- [19] Di Bugno, M., Guerra, S., Liberato, A. & Ambrosino G.: CEDM - Centre for Eco- City Freight Distribution. Un approccio integrato alla city logistics. Lucca. Lucca: 2008.



## Eksperimentalno istraživanje i numeričko modeliranje lijepljenog lameliranog drva

Jelena Lovrić Vranković<sup>1</sup>, Ivica Boko<sup>1</sup>, Vladimir Divić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Republika Hrvatska, {jlovric; iboko; vdivic}@gradst.hr

### Sažetak

U ovom su radu prikazani eksperimentalni testovi i numeričko modeliranje lijepljenih lameliranih greda izrađenih od različitih vrsta mekog i tvrdog drva (hrast, bagrem i smreka). Lijepljene lamelirane grede promatrane su tijekom ispitivanja na savijanje u tri točke na kratkim uzorcima. Eksperimentalni testovi uključuju mjerenja primijenjenih sila te deformacija i pomaka pomoću linearnog varijabilnog diferencijalnog transformatora (LVDT). U radu su prikazane karakteristike ispitnih uzoraka, postupak i rezultati ispitivanja na savijanje te modeliranje istih uzoraka pomoću računalnog programa ANSYS 16.2. Cilj ovog istraživanja je opisati ponašanje svakog uzorka posebno. Posebna pozornost se posvećuje analizi tipa i mehanizma otkazivanja greda izrađenih od tvrdog i mekog drva. Mehanička svojstva dobivena iz eksperimenata uspoređena su s rezultatima dobivenim numeričkom analizom.

*Ključne riječi:* lijepljeno lamelirano drvo, test savijanja u 3 točke, mehanizam otkazivanja, Ansys

## Experimental testing and numerical modelling of glued laminated timber

### Abstract

This paper presents experimental testing and numerical modelling of glulam beams made from different softwood and hardwood species (oak, acacia and spruce). The glulam beams are observed during 3-points bending tests on short samples. Experimental tests include measuring applied forces, deformations and displacements using the linear variable differential transducer (LVDT). The present report shows details of the test specimens, test set-up, results of the bending tests and numerical modelling using computer program Ansys. The current research aims to describe the behaviour of each specimen individually. Particular attention is given to the accurate analysis of the type and mechanisms of failure of beams made of hardwood and softwood. The mechanical properties obtained from the experiments are compared with the results from numerical analysis software.

*Keywords:* glue laminated timber, 3-points bending test, mechanisms of failure, Ansys

## **1. Uvod**

Drvo je ekološki i obnovljiv materijal te je jedan od najvažnijih prirodnih materijala. Ima specifična fizikalna, kemijska, mehanička i tehnološka svojstva. Prednosti drva koje ga čine ravnopravnim s ostalim građevnim materijalima su: mala težina elemenata, laka obradljivost, velika čvrstoća paralelno s vlakancima, mala osjetljivost na temperaturne promjene, mnogobrojne mogućnosti oblikovanja i montaže te transporta konstrukcijskih elemenata. Pored prednosti, drvo ima i svoje nedostatke, a to su nehomogenost, utjecaj insekata i gljiva, higroskopnost, ovisnost mehaničkih svojstava o sadržaju vlage u drvu, skupljanje i bubrenje te zapaljivost. Isto tako, drvo je anizotropan materijal, ali se obično smatra ortotropnim materijalom s tri glavne osi ortotropije L, R i T (uzdužna, radijalna i tangencijalna) među kojima postoji velika razlika u mehaničkim svojstvima [1]. Uzdužna os L je paralelna s vlakancima, radijalna os R je okomita na vlakanca (u smjeru normale na rast godova), dok je tangencijalna os T okomita na vlakanca u smjeru tangente na rast godova. Između ostalog, drvo u konstrukcijskom smislu možemo upotrebljavati kao monolitno (puno) drvo te lijepljeno lamelirano drvo. Lijepljeno lamelirano drvo podrazumijeva konstrukcijski element dobiven lijepljenjem lamela različitih dimenzija koji u nosivoj konstrukciji ima bolja mehanička svojstva od monolitnog piljenog drva. Također, ovisno o mikrostrukтури, drvo možemo podijeliti na meko drvo (četinjače) i tvrdo drvo (listače). Upotreba mekog drva u lijepljenim lameliranim nosačima je dominantna već dugi niz godina zbog svoje dostupnosti diljem Europe. U posljednje vrijeme, dostupnost tvrdog drva se povećala zbog pošumljavanja i obnove pokrivača šume te bolje prilagodbe tlu i utjecaju na klimatske uvjete. Tvrdo drvo ima veću gustoću što implicira bolje mehaničke karakteristike od mekog drva, dok je lijepljenje lamela od tvrdog drva puno kompleksnija zadaća zbog drugačije strukture vlakanaca.

U ovom su radu prikazana eksperimentalna istraživanja lijepljenih lameliranih greda izrađenih od različitih vrsta drva (hrast, bagrem i smreka). Jedan od koraka u ovom istraživanju bio je prikupiti materijalne karakteristike svake grede pojedinačno te ih koristiti kao ulazne podatke za numerički model. Poseban naglasak dan je na usporedbi načina otkazivanja mekog i tvrdog drva. Rezultati su pokazali kako mehanizmi otkazivanja koji uključuju vlačni lom praćen delaminacijom, uzrokuju smanjenje krutosti i povećanje deformacija greda [2]. Konačno, rezultati eksperimentalnih testova su uspoređeni s rezultatima numeričke analize.

## **2. Metodologija**

### **2.1. Eksperiment**

Eksperiment se provodio u laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu. Prije ispitivanja, izmjerene su točne dimenzije tri uzorka pravokutnog poprečnog presjeka (Tablica 1). Lijepljene lamelirane grede ispitane su savijanjem u 3 točke (engl. 3-point bending tests). Eksperimentalni testovi uključuju mjerenja primijenjenih sila, deformacija i pomaka. Uzorci S1 i S2 postavljeni su na dvije metalne šipke dimenzija 25 mm

koje su oslonjene na dvije betonske kocke (Slika 1), dok je uzorak S3 postavljen na dva metalna elementa dimenzija 10 x 10 x 100 mm koji su oslonjeni na dvije betonske kocke.

**Tablica 1.** Dimenzije greda

Uzorak	Vrsta drva	Poprečni presjek [mm/mm]	Duljina [mm]	Broj lamela
S1	Hrast	100/103	800	5
S2	Bagrem	93/103	800	5
S3	Smreka	99/100	800	3



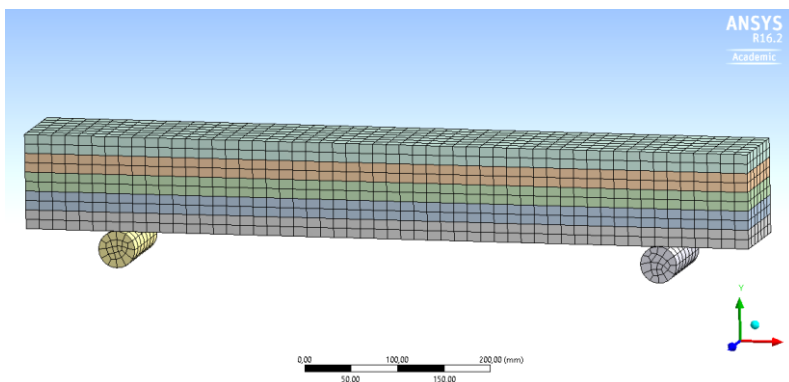
**Slika 1.** Eksperiment

Sila se unosi hidrauličkom prešom postupno kroz vrijeme do trenutka otkazivanja elementa na polovini duljine elementa. Pomaci i deformacije su mjereni pomoću LVDT-a (linearni varijabilni diferencijalni transformator) na sredini uzorka. LVDT senzor pretvara pravocrtne pomake objekta za koji je mehanički pričvršćen u odgovarajući električni signal. Korišten je senzor proizvođača HBM, nominalnog hoda 100 mm. Za mjerenje sile korištena je mjerna ćelija proizvedena na FGAG-u nazivne nosivosti 150 kN.

## **2.2. Numerički model**

Lijepljene lamelirane grede modelirane su u računalnom programu ANSYS Workbench 16.2 [3] zadavanjem karakteristika materijala i geometrije nosača (Slika 2). Provedena analiza je geometrijski nelinearna te je obavljen statički proračun. Računalni program ANSYS koristi Newton-Raphson metodu kao iterativni postupak rješavanja. U svakom iteracijskom koraku mijenja se tangencijalna matrica krutosti koja predstavlja nagib krivulje u dijagramu sila/progib osnovnog stanja iz kojeg polazi iteracijski korak. Inkrement progiba/rotacije izračunat je u svakom koraku sve dok se neravnoteža sila (rezidual) ne smanji na zadovoljavajuće malu vrijednost. Prilikom modeliranja koristio se koordinatni sustav koji se sastojao od tangencijalne (T), longitudinalne (L) i radijalne komponente (R). Unesene su karakteristike koje uključuju gustoću te ortotropna elastična svojstva materijala ( $E_L, E_T, E_R, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{RL}, G_{LT}, G_{RT}, G_{RL}$ ) (Tablica 2), gdje E označava modul elastičnosti, G modul posmika dok  $\nu$  označava Poissonov koeficijent. Neke mehaničke karakteristike su preuzete iz literature u svrhu modeliranja. Odabrana veličina mreže konačnih elemenata je 15 mm. S obzirom na to da je debljina lijepjenog sloja zanemariva u

odnosu na debljinu lamele, odabrana je vezana kontaktna površina između lamela (engl. bonded) što oponaša ponašanje ljepila [4]. Karakteristike lijepljenja kontaktne površine prikazane su na Slici 3. S obzirom na to da se u eksperimentu sila unosila kroz vrijeme, u numeričkom modelu taj je problem riješen tabličnim unosom sile u obliku 9 točaka sile (kN) – vrijeme (s), a koje su preuzete iz eksperimenta. U računalnom modelu promatrale su se deformacije, pomaci i naprezanja.



Slika 2. Ansys – 3D model

Details of "Contact Region"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	Solid
Target Bodies	Solid
[-] Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	2,0374 mm
Suppressed	No
[-] Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
[-] Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Slika 3. Karakteristike lijepljene kontaktne površine

**Tablica 2.** Karakteristike materijala

Uzorak	Vrsta drva	ME_L [N/mm <sup>2</sup> ]	ME_T [N/mm <sup>2</sup> ]	ME_R [N/mm <sup>2</sup> ]	V <sub>TR</sub>	V <sub>RL</sub>	V <sub>TL</sub>
1	Hrast	13000	1000	2000	0.292	0.064	0.033
S2	Bagrem	9900	810	1525	0.300	0.074	0.036
S3	Smreka	11100	477	866	0.245	0.004	0.025

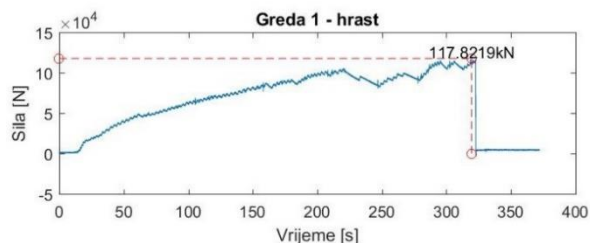
### 3. Rezultati

Uspoređeni su rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem u programu ANSYS i eksperimentalnim testom (Tablica 3.) te se može uočiti dobro podudaranje rezultata.

**Tablica 3.** Usporedba eksperimentalnog testa i numeričkog modela

Uzorak	Vrsta drva	Granično opterećenje [kN]	Pomak [mm] (Eksperimentalni test)	Pomak [mm] (Numerički model)
S1	Hrast	117.8	27	28.47
S2	Bagrem	94.2	25	23.1
S3	Smreka	56	11.5	13.9

Do otkazivanja uzorka S1 (hrast – tvrdo drvo) došlo je pri sili od 117.8 kN (Slika 4). Nakon što je dostignuta ova vrijednost, došlo je do naglog pada sile i loma uzorka te daljnjeg širenja pukotina oko područja donje lamele u vlačnoj zoni. Iz priložene fotografije (Slika 5) može se vidjeti oblik otkazivanja nosača – vlačni lom ispod mjesta unosa sile (na sredini nosača) praćen delaminacijom između lamela. Uzorak S2 otkazao je na isti način kao i uzorak S1. Što se tiče otkazivanja uzorka S3, može se uočiti oblik otkazivanja nosača – lom po lameli koji počinje od lijevog kraja nosača i širi se prema sredini nosača (Slika 6).



**Slika 4.** Graf sila – vrijeme za uzorak S1



**Slika 5.** Uzorak S1



**Slika 6.** Uzorak S3

#### **4. Zaključak**

U ovom su radu ispitivana mehanička svojstva lijepljenih lameliranih greda proizvedenih od različitih vrsta drva. Numerička analiza napravljena u programu Ansys 16.2. potvrdila je rezultate eksperimentalnog istraživanja. U vezi s načinom otkazivanja, može se uočiti kako su uzorci S1 i S2, a koji su izrađeni od tvrdog drva (hrast i bagrem), otkazali tako da je došlo do vlačnog loma po sredini uzorka praćenog delaminacijom između pojedinih lamela. Uzorak S3, izrađen od mekog drva (smreka), otkazao je uslijed loma koji se dogodio po lameli, a koji počinje od lijevog kraja nosača i širi se prema sredini nosača. Iz prethodno navedenog može se zaključiti kako je lijepljenje lamela izrađenih od tvrdog drva puno kompleksnija zadaća zbog drugačije strukture vlaknaca u odnosu na lamele od mekog drva na koje ljepilo bolje prijanja.

Preporučuje se provesti nova istraživanja kojima bi se testiranja vršila na gredama lijepljenim različitim vrstama ljepila te također na gredama izrađenim od različitih vrsta tvrdog i mekog drva. Isto tako, potrebno je povećati broj uzoraka te provesti statističku analizu.

## **Literatura**

- [1] Green, D.W., Winandy, J.E., Kretschmann, D.E.: Mechanical properties of wood, Wood handbook: Wood as an engineering material, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 4.1-4.45, 1999.
- [2] Gomes Ferreira, J., Cruz, H., Silva, R.: Failure behaviour and repair of delaminated glulam beams, Construction and Building Materials, 154, pp. 384-398, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.200.
- [3] Ansys, Inc. Canonsburg, PA 15317, Release 16.2, 2015.
- [4] Umaima Muhammed, C.K., Arya, R.: Analytical Study on Flexural Behaviour of Glued Laminated Timber, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, pp. 2485-2493, 2015, doi: 10.15680/IJIRSET.2016.0507110.





## Pregled statističkih metoda za procjenu kritične vremenske praznine na kružnom raskrižju

Danijela Maslač<sup>1</sup>, Zvonimir Jurić<sup>2</sup>, Kristina Miletić<sup>1</sup>

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, Republika Bosna i Hercegovina,  
[danijela.maslac@gf.sum.ba](mailto:danijela.maslac@gf.sum.ba), [kristina.miletic@gf.sum.ba](mailto:kristina.miletic@gf.sum.ba)

(2) Samostalni statističar/programer, Zagreb, [zvonimirjurić@yahoo.com](mailto:zvonimirjurić@yahoo.com).

### Sažetak

Za kalibraciju kružnog raskrižja ključni je parametar kritična vremenska praznina koja se ne može direktno mjeriti, već se statistički procjenjuje. U ovom će se radu prikazati odabrane, najčešće korištene statističke metode procjene. Upravo je procjena kritične vremenske praznine jedan od najzahtjevnijih zadataka znanosti analize prometnog toka kružnih raskrižja.

*Ključne riječi: kritična vremenska praznina, statističke metode, kružna raskrižja*

### An overview of statistical methods for estimating critical gap at a roundabout

#### Abstract

The critical gap is an important parameter for capacity analysis at the roundabout. This parameter is stochastically distributed, and it cannot be obtained directly by field measurements. Here are presented some often use estimation methods.

*Keywords: critical gap, estimation methods, roundabout*

## 1. Uvod

Kružna raskrižja postaju sve popularnija rješenja, a posebice radi sigurnosti i općenito učinkovitosti raskrižja. U odnosu na klasična raskrižja imaju veći kapacitet, kraća su zadržavanja te je i manja potrošnja goriva. U svrhu opravdanosti izgradnje raskrižja nužna je analiza ključnog kriterija tj. kapaciteta. U svijetu postoji veliki broj modela kapaciteta kružnih raskrižja koji su uglavnom prilagođeni uvjetima zemlje iz koje potječu.

Stoga je za analizu kapaciteta kružnog raskrižja bitna kalibracija parametara u lokalnim uvjetima.

Kalibracija je proces prilagodbe ulaznih parametara prema stvarnim, realnim prometnim uvjetima na raskrižju čije su vrijednosti mjerljive, a u svrhu dobivanja realnijih podataka teoretskih modela prema stvarnim uvjetima odvijanja prometa na njima.

Primjerice, prema modelu HCM2010 [1], kapacitet kružnog raskrižja iznosi:

$$c = Ae^{-Bv_c} \quad (\text{voz/h}) \quad (1)$$

gdje je:

$$A = \frac{3600}{t_f}$$

$$B = \frac{t_c - \frac{t_f}{2}}{3600}$$

$c$  - kapacitet privoza (traka) (voz/h),

$v_c$  - opterećenje glavnog toka (voz/h),

$t_f$  - vrijeme slijeda (s),

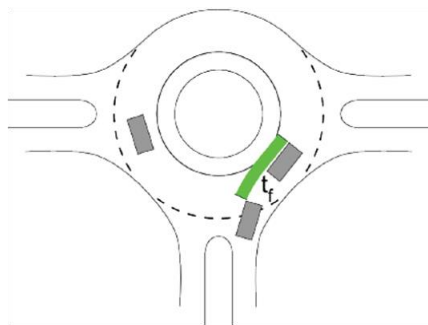
$t_c$  - kritična vremenska praznina (s).

## 2. Parametri kalibracije

Dakle vrijeme slijeda ( $t_f$ ) i kritična vremenska praznina ( $t_c$ ) su nužni parametri kalibracije kružnog raskrižja. Vrijeme slijeda može se direktno mjeriti na terenu, dok se kritična vremenska praznina ne može direktno mjeriti, već se eksplicitno procjenjuje na terenu.

## 2.1. Vrijeme slijeda

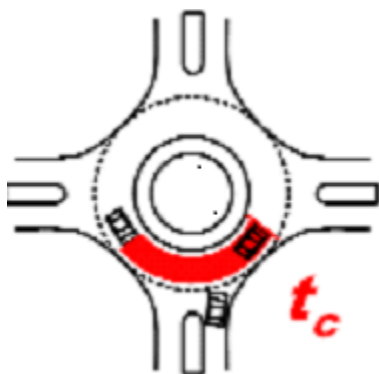
Vrijeme slijeda ( $t_f$ ) je prosječan vremenski interval između odlaska dva uzastopna vozila iz sporednog privoza u konfliktni presjek prioritarnog toka u uvjetima kontinuirane kolone u sporednom privožu (Slika 1).



Slika 1. Vrijeme slijeda [3]

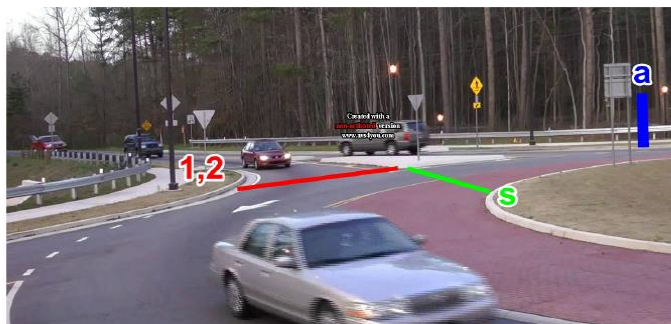
## 2.2. Kritična vremenska praznina

Kritična vremenska praznina ( $t_c$ ) predstavlja minimalnu vremensku prazninu koju će vozilo sporednog toka prihvatiti za ulazak u glavni tok [2] (Slika 2). Ne može se eksplicitno mjeriti, te su za procjenu kritične vremenske praznine potrebni podaci o odbačenim i prihvaćenim vremenskim prazninama vozila sa sporednog toka.



Slika 2. Kritična vremenska praznina [3]

Prihvaćene i odbačene vremenske praznine mjere se direktno, najčešće s videosnimke, registrirajući ključne događaje, kao na Slici 3.



Slika 3. Ključni presjeci za registriranje [3]

Nadalje na temelju podataka o prihvaćenim i odbačenim vremenskim prazninama, odabranom statističkom metodom procjenjuje se kritična vremenska praznina.

U literaturi se spominje velik broj metoda, a neke od njih će se izložiti u nastavku ovog rada. Svaka od tih metoda daje različite vrijednosti parametra.

### 3. Metode procjene kritične vremenske praznine

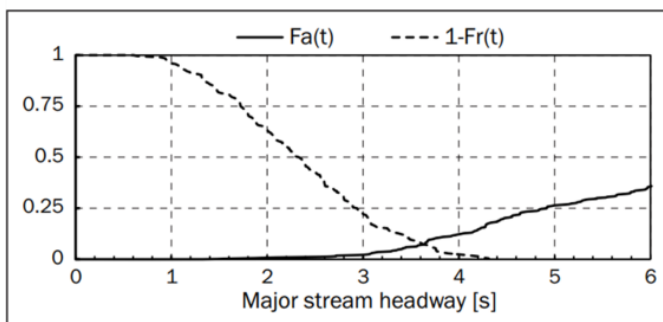
#### 3.1. Raff metoda

Raff metoda je neparametarska metoda procjene, dakle ne zahtijeva unaprijed definiranu razdiobu vremenskih praznina unutar glavnog toka, već izravno iz podataka o prihvaćenim i odbačenim vremenskim prazninama konstruira empirijske razdiobe pomoću kojih se traži rješenje.

Metoda je grafička i zasnovana je na Raffovoj definiciji [4], dakle kritičnu prazninu ( $t_c$ ) definira kao prazninu koja ima jednak broj prihvaćenih kraćih praznina i broj dužih odbačenih praznina. Kod ove metode koriste se dvije kumulativne krivulje raspodjele:

- $F_a(t)$  je empirijska kumulativna funkcija distribucije za prihvaćene praznine,

- $F_r(t)$  za odbačene praznine.



Slika 4. Grafički prikaz Raff metode [4]

Sjecišta krivulje **Fa(t)** s krivuljom **1 - Fr(t)** daje vrijednost  $t_c$  za kritičnu vremensku prazninu koja predstavlja medijan distribucije kritičnih praznina. Krivulja je stepenasta i sastoji se od diskretnih točaka.

### 3.2. MLM metoda

Metoda maksimalne vjerojatnosti (MLM) je parametarska metoda pa se treba unaprijed definirati razdioba za koju se onda traže potrebni parametri (očekivanje, standardna devijacija...)

U literaturi NCHR 572 se preporučuje koristiti log-normalnu razdiobu zato što jako dobro opisuje ovu vrstu podataka, asimetrična je i daje isključivo pozitivne vrijednosti.

Funkcija vjerojatnosti definira se kao vjerojatnost da se distribucija kritične praznine nalazi između promatrane distribucije maksimalnih odbačenih praznina i prihvaćenih praznina, prema izrazu (2)

$$L = \sum_{d=1}^n \ln[F_a(a_d) - F_r(r_d)] \quad (2)$$

gdje je:

$d$ - vozač na sporednom privozu (veličina uzorka  $n$ ),

$a_d$ -prihvaćena praznina,

$r_d$ -odbaćena praznina.

U ovom se modelu uzimaju u obzir samo maksimalne odbaćene praznine, koje su manje od odgovarajućih prihvaćenih praznina.

Dakle za prihvaćenu prazninu  $a$ , postoji samo jedna odgovarajuća odbaćena praznina  $r$  koja se razmatra.

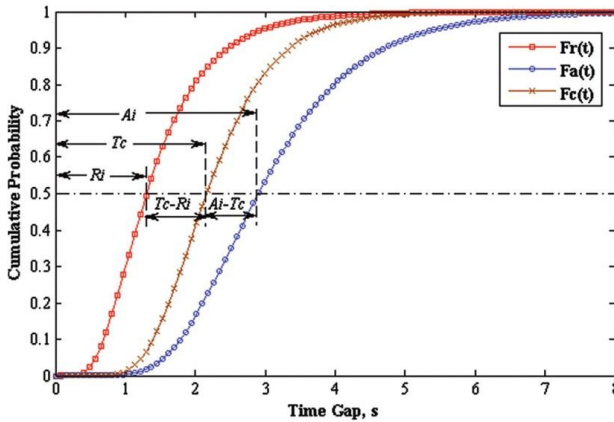
Za jednog individualnog vozača  $d$  na sporednom toku (privozu) promatra se: jedna prihvaćena praznina  $a_d$  i jedna odgovarajuća maksimalna odbaćena praznina  $r_d$ . Maksimalna odbaćena praznina je najveća vrijednost svih odbačenih praznina za individualnog vozača na sporednom toku. MLM metoda temeljena je na pretpostavci da su svi vozači na sporednom privozu konzistentni i homogeni ( $a_d \geq r_d$ ).

To znači da će svaki vozač na sporednom toku odbaciti svaku prazninu koja je manja od njegove kritične vremenske praznine te da će prihvatiti prvu prazninu koja je veća od kritične. Slika 5 predstavlja grafički prikaz MLM metode procjene kritične vremenske praznine, gdje je:

**Fa(t)** - krivulja funkcije vjerojatnosti prihvaćenih praznina,

**Fc(t)** - krivulja funkcije vjerojatnosti kritične vremenske praznine,

**Fr(t)** - krivulja funkcije vjerojatnosti odbačenih praznina.



Slika 5. Grafički prikaz MLM metode [5]

### 3.3 Logit metoda

Logit metoda koristi negativni logaritam funkcije vjerodostojnosti (*Likelihood*) [4]. Razvijeno je nekoliko pristupa koji se mogu sažeti kao logit modeli. Logit je u osnovi linearni regresijski model s matematičkim oblikom kao što je prikazano u jednadžbi (3):

$$P(a) = (1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1(i))})^{-1} \quad (3)$$

gdje je  $i$  - vjerojatnost prihvatanja praznine veličine,  $\alpha$ ,  $\beta$ -regresijski koeficijenti.

Ovaj model često služi i za provjeru utjecaja različitih neovisnih varijabli u kritičnoj praznini, kao što je vrijeme čekanja, prosječna brzina, itd.

Treba napomenuti da s ovom formulacijom vozač koji prihvaća prazninu manju od prethodno odbačene, ne može se definirati kao "nekonzistentan" jer vrijeme čekanja može objasniti to ponašanje. Stoga treba uključiti sve praznine, ne samo onu maksimalnu koju svaki vozač odbaci.

### 3.4. Wu metoda

Wu metoda se temelji na ravnotežnoj vjerojatnosti odbačenih i prihvaćenih smjerova.

Ne zahtijeva unaprijed definiranu funkciju raspodjele kritičnih praznina ili pretpostavke o dosljednosti ili homogenosti vozača. Kumulativna je funkcija gustoće (CDF-*cumulative distribution function*) kritičnih praznina.

Glavna prednost ovog modela je da pruža pravi prosjek kritične vremenske praznine, a za to ne treba unaprijed definirana funkcija distribucije kritične vremenske praznine. Pretpostavke se odnose na dosljednost i homogenost vozača dok je MLM trebao unaprijed definiranu funkciju raspodjele, kao i ove pretpostavke.

Definirana je matematičkim izrazom

$$F_{tc}(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} = 1 - \frac{1 - F_r(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} \quad (4)$$

gdje je:

$F_a(t)$ -funkcija vjerojatnosti prihvaćenih praznina,

$F_r(t)$ - funkcija vjerojatnosti odbačenih praznina.

Ova metoda daje empirijsku distribuciju kritičnih praznina što može biti korisno za mikroskopsku simulaciju.

#### **4. Zaključak**

Procjena kritične vremenske praznine zahtjevan je dio kalibracije kružnog raskrižja, a posebice zbog velikog izbora statističkih metoda. Ovaj rad je kratki pregled najčešće korištenih statističkih metoda procjene, a daljna istraživanja su temeljena na njihovoj primjeni.

Naime svaka od ovih metoda daje različite vrijednosti kritične praznine, stoga je nužno odrediti pri kojim uvjetima se koja metoda treba koristiti.

#### **Literatura**

- [1] Transportation Research Board of the National Academies NCHR 572, Roundabouts in the United States, 2007.
- [2] Cvitanić, D.: Modeliranje kapaciteta i odrađivanje razine usluge nesemaforiziranih raskrižja, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2000.
- [3] Barry, C.: Calibration of the hcm 2010 single-lane Roundabout capacity equations for Georgia conditions, disertacija, Georgia, 2012. I riječ disertacija bi trebala biti napisana na engleskom jeziku kada je već sve drugo tako napisano
- [4] Vasconcelos, A. L. P., Seco, Á. J. M., Silva, A. M. C. B.: Comparison of Procedures to Estimate Critical Headways at Roundabouts, *Promet – Traffic&Transportation*, Vol. 25, 2013, doi: 10.7307/ptt.v25i1.1246.
- [5] Ahmad, A., Rastogi, R., Chandra, S.: Estimation of critical gap on a roundabout by minimizing the sum of absolute difference in accepted gap data , *Canadian Journal of Civil Engineering* 42(12), 2015, doi:10.1139/cjce-2014-0450 .
- [6] Amin, H.J., Maurya A. K.: A review of critical gap estimation approaches at uncontrolled intersection in case of heterogeneous traffic conditions, *Journal of Transport Literature*, 9(3): 5-9, Jul. 2015, doi:10.1590/2238-1031.jtl.v9n3a1.
- [7] Wu, N.: Estimating Distribution Function of Critical Gaps at Unsignalized Intersections Based on Equilibrium of Probabilities. *Transportation Research Record*, No. 2286 (TRB 2012 Annual Meeting, Preprint No. 12-0453). TRB, National Academies, Washington, D.C., USA, 2012.
- [8] Gazzarri, A., Martello, M. T., Pratelli, A., Souleyrette, R. R.: Estimation of Gap Acceptance Parameters for HCM 2010 Roundabout Capacity Model Applications" *Civil Engineering Faculty Publications*. Paper 3, 2012, doi: 10.2495/UT120271.





## Arhitektura, konstrukcija i konzervacija: reprezentativna palača tridesetih godina u Zagrebu

Cela Matan<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, [cela.matan@uniri.hr](mailto:cela.matan@uniri.hr)

### Sažetak

Cilj je ovog rada predstavljanje doktorske disertacije *Arhitektura, konstrukcija i konzervacija: reprezentativna palača tridesetih godina u Zagrebu* obranjene na Sveučilištu Roma "Tor Vergata", Rim, Italija 2010. godine. U radu je analizirana kompleksna tipologija zgrada, pretežno poslovne namjene, nastale na vrhuncu zagrebačkog modernog pokreta - tridesetih godina dvadesetog stoljeća u Donjem gradu, današnjem središtu Zagreba. Razmatrana tipologija prerasta prvotnu inačicu poslovnih građevina s funkcionalnom podjelom po etažama i postaje kompleksan spoj raznolikih sadržaja za veliki broj korisnika; zajednička karakteristika odabranih građevina je da su sve predstavništva poduzeća ili udruga građana radi čega su u istraživanju nazvane *reprezentativna palača*. Analiza objedinjuje desetak palača koje danas čine antologijsko tkivo grada te otkriva Zagreb kao konzervativnu sredinu po pitanju konstruktivnih karakteristika građevina, primjene suvremenih materijala i njihovih mogućnosti.

*Ključne riječi: 1930-te, zagrebačka moderna arhitektura, povijest konstrukcija*

## Architecture, construction and conservation: representative palace in Zagreb during 1930ies

### Abstract

The goal of this article is a presentation of a doctoral dissertation *Architecture, construction and conservation: representative palace in Zagreb during 1930ies* completed at the Italian University Roma „Tor Vergata“, in 2010. A complex building typology mainly of business function is being analyzed; the buildings were constructed at the peak of the modern movement in Zagreb-during 1930ies, in today's downtown called Donji Grad. This studied typology outgrows the first version with functional division per floors and becomes a complex mix of various components for a large number of users. All the chosen buildings are built as seats of firms and citizen's associations, that's why they get called representative palaces in the research. The analysis connects ten palaces which make today the anthological tissue of the town, and discovers Zagreb as a conservative milieu concerning constructive characteristics and the use of modern materials.

*Keywords: 1930ies, modern architecture in Zagreb, history of construction*

## 1. Uvod



**Slika 1.** Prikaz Donjeg grada (centra Zagreba) s obilježenim pozicijama analiziranih građevina (karta preuzeta s Google earth aplikacije).

Cilj je ovog rada predstavljanje doktorske disertacije *Arhitektura, konstrukcija i konzervacija: reprezentativna palača tridesetih godina u Zagrebu* obranjene na Sveučilištu Roma "Tor Vergata", Rim, Italija 2010. godine. U radu je analizirana kompleksna tipologija zgrada, pretežno poslovne namjene, nastale na vrhuncu zagrebačkog modernog pokreta - tridesetih godina dvadesetog stoljeća u Donjem gradu, današnjem središtu Zagreba (Slika 1). Razmatrana tipologija prerasta prvotnu inačicu poslovnih građevina s funkcionalnom podjelom po etažama i postaje kompleksan spoj raznolikih sadržaja za veliki broj korisnika; zajednička karakteristika odabranih građevina je da su sve kao predstavništva poduzeća ili udruga građana građene kako bi predstavile svoje naručitelje u skladu sa suvremenim arhitektonskim tendencijama, radi čega su u istraživanju nazvane *reprezentativna palača*. Analiza objedinjuje desetak palača koje danas čine antologijsko tkivo grada te otkriva Zagreb kao konzervativnu sredinu po pitanju konstruktivnih karakteristika građevina, primjene suvremenih materijala i njihovih mogućnosti (Tablica 1).

Dok su arhitektonske ideje modernog pokreta u Zagrebu bile prigrljene od kraja dvadesetih godina, analizom odabranih palača doznajemo da to nije bio slučaj s konstruktivnim karakteristikama i tehnologijom izgradnje ni tridesetih godina. Primjena suvremenih materijala kao što je armirani beton i staklo, u tradicionalnoj zagrebačkoj sredini smatra se eksperimentalnom te je rezervirana isključivo za reprezentativne građevine s najvećim budžetom izgradnje. Većina građevina izgrađenih u Zagrebu tridesetih godina tek je prilagođena suvremenom arhitektonskom izričaju i uporabi armiranog betona, ali bez hrabrih konstruktivnih iskoraka što potvrđuju rezultati istraživanja.

## 1.1. Definiranje tipologije analiziranih zgrada



Slika 2. Napretkova zadruga. (fotografija: autor).

Prvotna inačica poslovne tipologije zgrada u Zagrebu razvila se nakon što je početkom dvadesetog stoljeća bila dopuštena nadogradnja do tri etaže na postojeće jednokatnice. Ovo dovodi do razvoja nove tipologije stanovanja s lokalima u prizemlju te uredima vlasnika na mezaninu, a kasnijim razvojem centra grada, pretvara se u dvije komercijalne etaže [1]. Povjesničar arhitekture Aleksander Laslo naziva to *vertikalnim zoningom* koji su prihvatili bankari, industrijalci i trgovci kao najpodobniji model. Ova funkcionalna organizacija građevina po etažama stvara podlogu za još kompleksniju tipologiju kojom se u ovom istraživanju bavilo: sadržajno hibridnim građevinama u kojima je poslovna funkcija gotovo uvijek kombinirana sa stanovanjem, komercijalnim, ugostiteljskim i javnim sadržajima [2,3]. Riječ je o danas antologijskim građevinama u centru Zagreba: predstavništvima stranih poduzeća (*Shell, Assicurazioni Generali*), javnim ustanovama i poduzećima (*Pošta, Gradska poduzeća, Policijska uprava, Burza rada, Radnička komora, Obrtnička komora*) te udrugama građana (*Napretkova zadruga* (Slika 2.), *Gospodarska sloga*). Budući da je u većini slučajeva sadržaj građevina bio od javnog interesa, investicije je podržao Grad Zagreb dodjeljivanjem gradskog zemljišta. Građevine nastaju kao dio ranije formiranog urbanog tkiva grada, često na uglovima urbanih blokova kreirajući raznolikim rješenjima nove reperne točke u gradu. Dopuštena visina građevina u Donjem gradu bila je četiri etaže, ali gradi se uglavnom više od pet etaža. Projekti su se najčešće naručivali direktno od arhitekata, a gradnja palača trajala bi u prosjeku dvije godine.

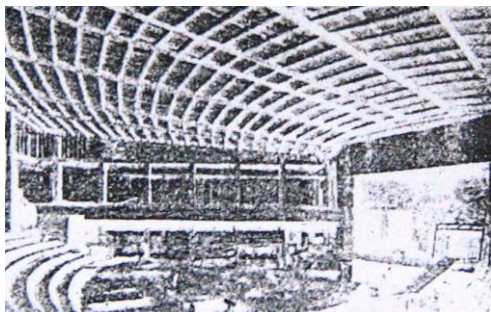
*Reprezentativne palače* donose zanimljiva funkcionalna rješenja što je posebno izraženo kod građevina javne i socijalne namjene koje u sebi objedinjuju cijeli niz kompleksnih potreba velikog broja korisnika te se u različito doba dana koriste za različite namjene, npr. dvorana *Radničke komore* u večernjim satima koristila se kao gradska dvorana za ples i

priredbu u nedostatku sličnih prostora u gradu, a pojedine etaže *Burze rada* kao hotel za nezaposlene radnike ili stanovanje za pojedine zaposlenike.

## 2. Konstruktivne karakteristike

Analizom konstruktivnih karakteristika odabranih građevina otkrivamo da je najvažnija dekada modernog pokreta u Zagrebu bila period prilagodbe arhitektonskih trendova lokalnim znanjima i mogućnostima. Izgradnja moderne arhitekture brža je i ekonomski isplativija od tradicionalne, a nepovjerljivost prema novim materijalima i tehnikama rješava se opreznom implementacijom te obrtničkom vještinom i kreativnošću. U analiziranim građevinama pronalazimo želju za sustizanjem suvremenih tendencija u primjeni konstruktivnih rješenja te nesklonost eksperimentu što je razumljivo kada se uzme u obzir da se do tridesetih godina gradi najčešće na osnovi iskustvenih saznanja u opeci te se vrlo rijetko izrađuje statički proračun: „armatura se postavljala slobodnom procjenom jer nitko nije znao napraviti statički proračun“, duhovito je komentirao inženjer Đuro Peulić u svojoj knjizi „Konstruktivni elementi zgrada“ [4]. Od 1932. primjenjuje se privremeno njemački zakon za armirani beton, a od 1933. prema „Zakonu za izgradnju u armiranom betonu“ projektiranje i izgradnja konstruktivnih elemenata od armiranog betona bila je dopuštena samo ovlaštenim inženjerima [5]. Za eksperimentiranja je bila potrebna posebna dozvola te dokaz o kvaliteti materijala i stabilnosti konstrukcije. Od 1935. prelazi se na švicarski zakon o armiranom betonu koji inženjerima donosi više slobode da projektiraju umjesto da primjenjuju zakon „kao recept“ [6].

Dok se kod najraširenije stambene tipologije zgrada armirani beton koristio tek u 10% slučajeva, armiranobetonska nosiva konstrukcija kod *reprezentativne palače* je pravilo [7]. Kod analiziranog uzorka građevina pronalazimo dva tipa konstruktivnog sustava: skeletni i sustav nosivih zidova i stupova od armiranog betona uglavnom manjih raspona. Konstruktivno su najzanimljiviji dijelovi analiziranih građevina velika dvorana u *Radničkoj komori* te konstrukcija nadsvijetla nad blagajničkom dvoranom u zgradi *Gradskih poduzeća*.



**Slika 3.** Fotografija velike dvorane u Radničkom domu tijekom izgradnje. (u novoj zgradi Radničke komore davat će predstave posebno radničko kazalište, Jutarnji list, 8, 30.06.1937.)

Velika dvorana u *Radničkoj komori* je prema projektu iz 1934. arhitekata Grupe KKK (Jovana Korke, Đorđa Krekića i Georgija Kiveorva) i arhitekta Vladimira Šterka zaobljene trapezne forme (linija stropa dvorane bila je zaobljena u uzdužnom smjeru), rebrastog armiranobetonskog stropa na rasponu od 23 do 40 m (Slika 3). Iz nepoznatih razloga ova se konstrukcija na kraju izvodi od čelika. Ova je građevina također jedna od rijetkih s pravim armiranobetonskim skeletnim sustavom na rasponima od 7,3 m te se i u funkcionalnom rješenju građevine primjenjuju datosti ovog konstruktivnog rješenja.



**Slika 4.** Fotografija nadsvjetla nad blagajničkom dvoranom u zgradi Gradskih poduzeća (iz arhive Arhitektonskog studija Mistrija).

Zanimljiv konstruktivni element u zgradi Gradskih poduzeća je konstrukcija nadsvjetla nad blagajničkom dvoranom u formi dvostrešnog krovništva delikatnih željeznih „L“ profila dimenzije 23.5 m x 15.5 m, visine 5.5 m pokrivenog armiranim staklom (Slika 4). Konstrukcija je s donje strane bila zatvorena podgledom od običnog stakla te je noću bila osvijetljena. U prostor nadsvjetla moglo se ući radi održavanja.

### **3. Primijenjeni materijali**

Građevinski materijali koji se primjenjuju na gradilištima uvoze se iz Mađarske i tadašnje Čehoslovačke ako nisu bili dostupni na domaćem tržištu, a primjena proizvoda domaće proizvodnje bila je naročito poticana kod građevina koje je sufinancirao Grad ili Država.

Stropovi analiziranih građevina građeni su kao armiranobetonski rebrasti monolitni i polumontažni. Npr. u zgradi Gradskih poduzeća stropovi su izvedeni korištenjem ispuna od prefabriciranih šupljih ispuna od plinobetona (kao strop Ethos) kolokvijalno nazvanih “šuplje kamenje” te izvođenjem armiranobetonskih gredica na licu mjesta. U većini građevina korišten je ravan krov čija je završna obloga često bio asfalt pa se krovovi koriste kao vrtovi i terase.

Uporaba staklene opeke Luxfer bila je raširena, primjenjivala se za osvijetljavanje podruma ili ulaznih prostora, isprva mađarske provenijencije, a kasnije i lokalne proizvodnje.

Fasade su najčešće završno žbukane, rješavane trakastim potezima prozora, ponekad zaobljenih volumena na kutovima urbanih blokova u skladu s popularnim modernističkim motivom. Prizemlje je obično naglašeno diskretnim uvlačenjem ili završnom obradom fasade (opeka, kamen, staklo) s uskim ulaznim trijemovima, a zadnja je etaža u pravilu uvučena.

Oživljavanjem građevinske djelatnosti u periodima između 1921. i 1931. te od 1934. do Drugoga svjetskog rata, stvorila se potreba industrijalizacije proizvodnje suhe žbuke (proizvedene u prahu da bi se potom miješale s vodom) koje su ranije bile uvožene (*Terranova, Terrasecuri*). Domaći proizvodi nose imena kao što su *Terrabona, Kremen*, a za interijere *Sanit* [9]. Boje žbuka dobivale su se dodavanjem prirodnog kamenog praha.

Za oblaganje pročelja kamenom koristi se uglavnom lokalni umjetni kamen. Primjeri fasada potpuno prekrivenih kamenom su *Assicurazioni Generali* i *Shell* za koje je korišten travertin, dok su *Obrtnička komora* te *Gradska poduzeća* prekriveni bizečkim kamenom. Iznimka je *Policijska uprava* u Petrinjskoj za koju su 1938. korištene ploče od azbest-cementa *Salonit* i *Obrtnička komora* kojoj je glavno pročelje djelomično dekorirano pločama od terakote.

Upotreba stakla je suzdržana. Unatoč primjeni skeletnih nosivih konstrukcija, većih staklenih ploha nema, osim u izlozima prizemlja.

Instalacije u analiziranim građevinama su moderne, imaju centralno grijanje, klasična i servisna dizala.

Podne su obloge uglavnom od hrastovog parketa, gume, terazza i ponekad linoleuma (*Gradska poduzeća*), cementni podovi korišteni su npr. u *Gradskim poduzećima* te zgradi *Javne burze rada* (tip *Dursilit*). U *Obrtničkoj komori* pronalazimo tradicionalni zemljani pod u podrumskim prostorima za čuvanje hrane.

Vrata i prozori su od hrastovine ili željeza koji su za vrijeme istraživanja bili u funkciji. U *Gradskim poduzećima* prozori su patenta *Nikolaus* sa četiri varijante otvaranja, također još u funkciji.

Autori građevina projektirali su i interijere pa tako i namještaj, murale, lampe itd. pojedini komadi namještaja još uvijek su se koristili za vrijeme istraživanja (*Napretkova zadruga, Radnička komora, Burza rada, Gradska poduzeća, Obrtnička komora*).

#### 4. Zaključak

Većina analiziranih građevina u vlasništvu je istog korisnika te ima istu namjenu od izgradnje do danas, ali to nije pomoglo očuvanju najvrjednijih karakteristika građevina ponajviše radi promjena navika i potreba korisnika. Današnji izgled građevina daje tek djelomično naslutiti njihovu izvornu vrijednost, mnogobrojne parcijalne preinake tijekom gotovo devet desetljeća uzele su svoj danak. Tome je pridonio i nedostatak svijesti o vrijednosti arhitektonske baštine iz perioda moderne te popratno i slaba zaštita ovih spomenika kulture.

Dok su arhitektonske ideje modernog pokreta u Zagrebu bile prigrljene od kraja dvadesetih godina dvadesetog stoljeća, analizom odabranih palača doznajemo da to nije bio slučaj s konstruktivnim karakteristikama i tehnologijom izgradnje ni tridesetih godina. Primjena suvremenih materijala kao što je armirani beton i staklo u tradicionalnoj zagrebačkoj sredini smatra se eksperimentalnom te je rezervirana isključivo za reprezentativne građevine s najvećim budžetom izgradnje. Većina građevina izgrađenih u Zagrebu 1930-ih godina tek je prilagođena suvremenom arhitektonskom izričaju i uporabi armiranog betona, ali bez hrabrih konstruktivnih iskoraka što potvrđuju rezultati istraživanja [8].

**Tablica 1.** Popis odabranih i analiziranih građevina

Naziv građevine	Današnja adresa	Datacija izrade projekata i gradnje*	Namjena građevine	Autori (arhitekti)	Katnost/nosivi sustav
1. Tržno nadzorništvo	Dolac 2	1927-28/ 1928-30	poslovna	Vjekoslav Bastl	4 nosivi zidovi+ stupovi
2. Palača Shell s Maričevim prolazom	Gajeva 5	1930 IP 1931GD 1932 UD	poslovna	Rudolf Lubinsky, Stanko Bučar, Bogdan Petrović	8 skeletni
3. Gradska poduzeća	Gundulićeva 32	1932 IP 1932 GD 1935 UD	poslovna	Juraj Denzler	8 skeletni
4. Radnička komora	Trg kralja Petra Krešimira IV/ 2	1934 LD 1935 GD 1938 UD	javno-poslovno-stambena	Jovan Korka, Đorđe Krekić , Georg Kiverov Vladimir Šterk	7 skeletni
5. Javna burza rada	Zvonimirova 15	1934 LD 1935 GD 1937 UD	javno-poslovno-stambena	Jovan Korka, Đorđe Krekić, Georg Kiverov, Vladimir Šterk	7 skeletni
6. Napretkova zadruga	Bogovićeva 1	1936/ 1936-37	javno-poslovno-stambena	Stjepan Planić	10 skeletni
7. Gospodarska sloga	Zvonimirova 17	1937-38/ 1939-39	javno-poslovno-stambena	Stjepan Gomboš, Mladen Kauzlarić	7 skeletni
8. Dom hrvatskih obrtnika	Ilica 49	1937 1937-39	javno-poslovno-stambena	Aleksandar Freudenreich, Zvonimir Požgaj	10 nosivi zidovi+ stupovi
9. Palača Assicurazioni Generali	Trg Bana Jelačića 3	1937 IP 1938 GD 1939 UD	poslovno-stambena	Marcello Piacentini	11 skeletni
10. Policijska uprava	Petrinjska 32	1938 IP 1938 GD 1940 UD	poslovna	Franjo Bahovec, Zvonimir Kavurić	7 skeletni
11. Pošta	Branimirova 4	1939-40 1940-41	poslovno-stambena	Egon Steinmann	7 skeletni

\*IP= idejni projekt, LD= lokacijska dozvola, GD= građevinska dozvola, UP= uporabna dozvola

## **Literatura**

- [1] Laslo, A.: Izgradnja javnih objekata u Zagrebu do 1940. Jedan od mogućih izbora, *Čovjek i prostor*, 3183 (1983) 360, pp. 25-29
- [2] Laslo, A.: Between two building codes, u E. Blau e I. Rupnik (ed.), *Project Zagreb/ Transition as Condition, Strategy*, Harvard University, Graduate School of Design, Barcelona, 2007
- [3] Laslo, A.: Zagrebačka arhitektura 30-tih/ Vodič, *Arhitektura*, (1988) 1-4, pp. 97-112
- [4] Peulić Đ.: *Konstruktivni elementi zgrada/ prvi dio*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973
- [5] Širola B.S.: Novi njemački propisi za armirani beton/ Propisi njemačkog odbora za armirani beton iz 1932 godine, *Građevinski vjesnik*, (1933) 4
- [6] Kahle D.: Zagrebačka ugradbena najamna kuća u razdoblju od 1935. do 1945. godine, *Prostor*, 25 (2003) 1, pp. 33-34
- [7] Vukić, F.: Dizajnerski aspekti rekonstrukcije dijela zgrade uprave gradskih poduzeća(danas: Elektra) arhitekta Jurja Denzlera, esej kao dio projekta rekonstrukcije zgrade Gradskih poduzeća u Zagrebu. *Arhitektonski studio Mistrinja; ALBINI, A.: Prije dvadeset godina*, *Građevinski vjesnik*, 4(1932), pp. 23-23
- [8] Sokolović A.: Suhe ili ukrasne žbuke, *Građevinski vjesnik*, 4(1932), pp. 80-82
- [9] U novoj zgradi Radničke komore davat će predstave posebno radničko kazalište, *Jutarnji list*, 8 (30.06.1937.), p. 38



## Kibernetika – što je to?

Dino Obradović<sup>1</sup>

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

### Sažetak

Kibernetika kao znanstvena disciplina je novijeg nastanka, dok se sama riječ koristila još davno. Često se koristi u različitim kontekstima i relativno teško ju je jednoznačno smjestiti u neko određeno područje ljudske djelatnosti. To je i istina, zato što se osnovni principi kibernetike mogu objasniti i shvatiti samo korištenjem pojmova iz različitih grana znanosti. Ona proučava opće zakonitosti procesa upravljanja i komunikacija, neovisno o njihovoj prirodi – u živim i neživim sistemima. U radu će se prikazati nastanak pojma (odnosno znanstvene discipline) kibernetika, povijesni razvoj kibernetike, te neka područja gdje se kibernetika koristi. Cilj rada je ukratko predstaviti i objasniti kibernetiku te, barem do određene mjere, generalno olakšati razumijevanje te vrlo zanimljive, i u novije vrijeme, sve popularnije multidisciplinarnе znanosti.

*Ključne riječi: kibernetika, Norbert Wiener, sistem, upravljanje*

## Cybernetics – what is it?

### Abstract

Cybernetics, as a scientific discipline, was conceived rather recently, while the word itself has been used for a very long time. It is often used in various contexts, and it is relatively difficult to assign a single meaning to it and define a specific area of human activity which it would designate. Another reason for this is the fact that the basic principles of cybernetics can only be explained and understood by using terms from various other branches of science. It studies the general principles of control and communication systems, regardless of their nature – in both living and inanimate systems. This paper will demonstrate the origin of the term (i.e. the scientific discipline) cybernetics, the development of cybernetics through history, and some areas where cybernetics is applied. The goal of this paper is to briefly introduce and explain cybernetics, and, to a certain extent, make this very interesting and lately increasingly popular multidisciplinary science easier to understand in general.

*Keywords: cybernetics, Norbert Wiener, system, control*

## 1. Uvod – pojam kibernetike

Pojam kibernetika (eng. *Cybernetics*, njem. *Kybernetik*) [1] ima više definicija i tumačenja. Općenito gledajući, riječ kibernetika dolazi od grčke riječi  $\kappa\upsilon\beta\epsilon\rho\nu\acute{\alpha}\omega$  (kybernao) koja znači upravljam, vladam, kormilarim [2÷4], odnosno grč. *kybernetes* – kormilar [4÷13]. Kibernetiku, u skladu s prethodno navedenim, možemo najkraće definirati kao vještinu upravljanja [11, 14, 15]. Prema [16], kibernetika je interdisciplinarna znanost o prijenosu informacija i upravljanju strojevima i živim organizmima ili o procesima vođenja usmjerenima određenom cilju. Wiener kibernetiku definira kao znanstvenu disciplinu koja se bavi upravljanjem sustavom [8, 17]. Kibernetikom se smatra znanost o vezi, upravljanju i kontroli nad strojevima i živim bićima [18÷23], odnosno disciplina koja proučava strukturu živih i neživih regulacijskih sustava te upravljanje njima [24]. Prema [25], kibernetika je znanost o određenim procesima upravljanja u dinamičkim sustavima osnovanim na principu povratne veze, pomoću kojih je omogućeno da se predviđeni ciljevi ovih sustava mogu postići na najpovoljniji način.

Sve prethodno navedene definicije definiraju kibernetiku kao znanost ili disciplinu koja se bavi proučavanjem komunikacije i upravljanja u živim i neživim sistemima.

Za sve procese upravljanja vrijede neki opći principi i zakonitosti neovisno o prirodi upravljivog sistema i njegovih ciljeva [26], te u osnovi kibernetike i leži ta ideja [27]. Ti principi i zakonitosti proučavaju se u jednom posebnom području teorije sistema koja se naziva kibernetika. Svaki sistem s upravljanjem naziva se kibernetički sistem. Upravljanje se sastoji od izbora više alternativa, odnosno više trajektorija sistema kojima se može stići do unaprijed definiranog cilja [26].

## 2. Povijesni razvoj kibernetike

Riječ kibernetika ima svoje korijene u dalekoj prošlosti. Sama se riječ prvi put javlja kod starogrčkog filozofa Platona (427. - 347. god. pr. Kr.) [3, 6, 9, 11, 13, 14, 28, 29], koja je značila vještinu upravljanja brodom, danas poznata kao navigacija [11]. Od vremena Platona pa tek do pojave rukopisa francuskoga fizičara i matematičara Andre-Marie Ampera pod nazivom "Eseji filozofije znanosti" 1843. godine, kibernetika kao pojam u svezi sa znanstvenim upravljanjem je u potpunosti nestao [11, 14]. Ampere koristi riječ kibernetika da bi označio znanost o upravljanju ljudskim društvom [3, 29].

Kibernetika se, u današnjem značenju riječi – odnosno kao znanost, počela stvarati odmah poslije Drugog svjetskog rata. Kibernetika se razvila na međunarodnim sastancima u razdoblju od 1944. do 1953. koje su držali istaknuti intelektualci, uključujući Norberta Wienera, John von Neumanna, Warrena McCullocha, Claudea Shannona, Heinza von Foerстера, Gregoryja Batesona, Margaret Mead, Artura Rosenbluetha, Waltera Pittsa, itd. [10, 13, 30, 31]. Sastanci su se zvali The Macy Conference i bili su održavani u New Yorku, a smatraju se početcima razvoja kibernetike i teorije sistema [31]. Promatranjem prethodno navedenih znanstvenika, uočava se da su to znanstvenici iz različitih područja znanosti. Tako, npr. Norbert Wiener i John von Neumann su bili matematičari, Warren McCulloch je bio psihijatar, Heinz von Foerster biofizičar, Gregory Bateson antropolog, itd. [31]. Sada se



takvim sustavima. Imajući to u vidu, znanstvenici, suvremenici N. Wienera prionuli su istraživanju brojnih aspekata i načina upravljanja sustavima različitih vrsta, svojstava i tipova. Tako je u razmjerno kratkom vremenu nakon pojave kibernetike razvijeno nekoliko desetaka različitih novih teorija koje svoje uporište nalaze u kibernetici, a nastoje objasniti pojedine aspekte procesa upravljanja sustavima. Takve se izvedene, specijalizirane znanstvene discipline nazivaju derivatima (izvedenicama) kibernetike [9].

Od posebnog su interesa sljedeći derivati kibernetike:

- teorija komunikacija,
- teorija odlučivanja,
- teorija programiranja,
- teorija povratne veze i
- opća teorija sustava [9, 29].

Teorija komunikacija nastoji istražiti i iskoristiti zakonitosti slanja, prijenosa, primanja i tumačenja prostorno i vremenski moduliranih signala [29]. Teorija odlučivanja omogućuje da se transformacijom informacija pomoću pravila odlučivanja između više alternativa odabere optimalna [29], a upravo smo u građevinarstvu kod izvedbe projekta suočeni s odlučivanjem. Teorija programiranja bavi se definiranjem načina sustavnog korištenja prikupljenih, odnosno postojećih informacija (znanja) u upravljanju sustavima. Njome su obuhvaćene dvije specijalne teorije: teorija algoritama i teorija automata [9].

Teorija povratne veze ima ključnu ulogu u istraživanju regulacije procesa, odnosno u praktičnim situacijama upravljanja složenim sistemima [29], kao što je npr. gradilište ili projekt.

Teorija sistema omogućila je stvaranje metoda i tehnika za potrebe analize kompleksnih sistema [29].

#### **4. Kibernetika danas**

Kibernetika, iako je nailazila na velike prepreke na putu svoje afirmacije i prihvaćanja, danas ima ogromno značenje u mnogim znanostima [29]. Poslijeratni je razvitak proizlazio iz djelovanja dva važna čimbenika: vremena i potreba za informacijama, koje bi povezivale različite odnose i pojave. Određivanja ta dva čimbenika u vremenu i prostoru dinamičnih promjena u svijetu, traže zapravo društvenu nužnost pojave znanosti o upravljanju – kibernetike. Njezin brzi razvoj opravdava, ali i potvrđuje potrebu njezina nastanka i objašnjava njezino općedruštveno prihvaćanje [11]. Potreba za kibernetikom se javlja u mnogim znanostima. U građevinarstvu svaki projekt čini sustav koji ima svoj cilj te je potrebno reguliranje različitih segmenata što se onda naziva vođenje projekta [36]. U vodnom gospodarstvu se također javlja potreba za reguliranjem - upravljanjem, bilo kod hidroelektrana gdje je potrebno uz određene dotoke vode imati ustaljenu proizvodnju električne energije ili kod rada crpnih stanica otpadnih voda koje, npr. trebaju povećati količinu crpljenja vode u slučaju većeg dotoka otpadne vode i u slučaju oborina. Nadalje kibernetika se javlja i u pedagogiji gdje je imala velik utjecaj na razvitak teorije i prakse nastave [37], u području organizacije i menadžmenta [17], informatici itd.

## 5. Zaključak

Kibernetika pripada u područje osnovnih znanstvenih disciplina, a njen predmet proučavanja je upravljanje bilo kojim sistemom, živim organizmom, mehanizmom ili kombiniranim sistemom. Osnovni principi kibernetike mogu se objasniti korištenjem pojmova iz različitih područja znanosti i tehnike. Ti su principi u svojoj osnovi veoma jednostavni i lako shvatljivi. Iako je kibernetika veoma mlada, u prethodno izloženom radu, vidljivo je da se pojam kibernetika koristio još davno u staroj Grčkoj. Tada je označavala vještinu upravljanja brodom – vještinu kormilarenja [38]. Platon u svojoj knjizi navodi da je kibernetika (vještina kormilarenja) mudra i skromna znanost (vještina), a kormilar iskrcavajući svoje putnike, zna da ih nije iskrcao boljima ni u jednom smislu no što su bili u trenutku ukrcavanja [39, 40]. Kibernetika se, u današnjem smislu riječi i kao znanost, prvi put javlja u knjizi Norberta Wienera, te se on smatra „ocem“ kibernetike. Kibernetika kao fundamentalna znanost ne nudi gotova rješenja upravljačkih problema, već samo otvara mogućnosti za njihovo uspješno rješavanje. Cilj rada je, kao što je i vidljivo iz naslova, čitatelja uvesti u osnove kibernetike, najkraće moguće objasniti što je to kibernetika te ga zainteresirati za daljnje istraživanje i proučavanje kibernetike.

## Literatura

- [1] Prager, A.: Trojezični građevinski rječnik, Masmedia, Zagreb, 2003.
- [2] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, mrežno izdanje, 2017. <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=31381>, 18.06.2018.
- [3] Uzelac, J.: Kibernetizacija poslovnog sustava, Ekonomski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 1994.
- [4] Novikov. D. A.: Cybernetics: From Past to Future, Heidelberg, Springer, 2015.
- [5] Wiener, N.: Kibernetika ili upravljanje i komunikacija kod živih bića, Izdavačko-informativni centar studenata, Beograd, 1972.
- [6] Guberinić, S., Matejić, V., Mikić, O., Petrović, R.: Sistemi, upravljanje sistemima, systemske discipline, tehnike i metode: leksikon pojmova s tumačenjima, Institut „Mihailo Pupin“, Beograd, 1970.
- [7] Anić, V., Goldstein, I.: Rječnik stranih riječi, Novi liber, Zagreb, 1999.
- [8] Wiener, N.: Kibernetika i društvo: ljudska upotreba ljudskih bića, Nolit, Beograd, 1964.
- [9] Panian, Ž.: Poslovna informatika za ekonomiste, Masmedia, Zagreb, 2005.
- [10] Ralston, A., Reilly, D. E., Hemmendinger, D. (ed.): Encyclopedia of computer science, fourth edition, Nature publishing group, London, 2000.
- [11] Bošković, D., Vukčević, M., Đukić, A.: Interakcijske sprege između navigacije, kibernetike i suvremenog menadžmenta, Pomorski zbornik, 39 (1), pp. 287-302, 2001.
- [12] Beer, S.: What is cybernetics?, Kybernetes, 31 (2), pp. 209-219, 2002, doi: 10.1108/03684920210417283.
- [13] Heylighen, F., Joslyn, C.: Cybernetics and Second-Order Cybernetics u Meyers, R. A. (ed.), Encyclopedia of Physical Science & Technology, 3rd edition, Academic Press, New York, pp. 155-170, 2001.
- [14] Bober, J.: Stroj, čovjek, društvo-kibernetika, Naprijed, Zagreb, 1970.

- [15] Kiš, M.: Englesko-hrvatski, hrvatsko-engleski informatički rječnik, Naklada Ljevak, Zagreb, 2000.
- [16] Proleksis enciklopedija, <http://proleksis.lzmk.hr/30849/>, 15.06.2018.
- [17] Jovanović, V., Ivković, V., Janović, T., Nazor, D.: Mozak, kompleksni sustavi i ljudske zajednice – suvremena antropološka perspektiva, Mozak i um: trajni izazov čovjeku, Institut društvenih znanosti Ivo Pilar, Zagreb, pp. 139-148, 2006.
- [18] Junaško, O., Čudanov, M., Jevtić, M., Krivokapić, J.: Osnovi organizacije i menadžmenta, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, 2014.
- [19] Yang, H., Chen, F., Aliyu, S.: Modern software cybernetics: New trends, The Journal of Systems and Software, 124 (C), pp. 169-186, 2017, doi: 10.1016/j.jss.2016.08.095
- [20] Cai, K.-Y., Cangussu, W. J., DeCarlo, A. R., Mathur, P. A.: An Overview of Software Cybernetics, Eleventh Annual International Workshop on Software Technology and Engineering Practice, Amsterdam, pp. 77-86, 2003, doi: 10.1109/STEP.2003.4
- [21] Šugman Bohinc, L.: Kibernetika spremembe in stabilnosti v kontekstu svetovalnega in terapevtskega dela s klientskim sistemom, Psihološka obzorja, 9 (2), pp. 87-101, 2000.
- [22] Šoti, F.: Uvod u kibernetiku, Osnovi teorija sistema i informacija, Radnički univerzitet „Radivoj Čirpanov“, Novi Sad, 1973.
- [23] Jelenković, B. N.: Matematika u vojnotehničkim dostignućima, Vojnotehnički glasnik, 10, pp. 172-179, 2009, doi: 10.5937/vojtehg1004172J.
- [24] Struna, Hrvatsko strukovno nazivlje, <http://struna.ihjj.hr/naziv/kibernetika/23251/>, 18.06.2018.
- [25] Jursa, O.: Kibernetika, Mladost, Zagreb, 1974.
- [26] Trbojević, B.: Organizacija građevinskih radova, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [27] Lerner, A. J.: Principi kibernetike, Tehnička knjiga, Beograd, 1970.
- [28] Đorđević, B.: Cybernetics in Water Resources Management, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 1993.
- [29] Nadrljanski, Đ., Nadrljanski, M.: Kibernetika u obrazovanju, udžbenik, Univerzitet u Novom Sadu, Učiteljski fakultet u Somboru, Sombor, 2005.
- [30] Umpleby, A. S., Dent, B. E.: The origins and purposes of several traditions in systems theory and cybernetics, Cybernetics and Systems: An International Journal, 30 (2), pp. 79-103, 1999, doi: 10.1080/019697299125299.
- [31] emcsr, <http://emcsr.net/looking-back-in-history-the-macy-conferences/>, 20.06.2018.
- [32] Luhmann, N.: Teorija sistema: svrhovitost i racionalnost, Globus, Zagreb, 1981.
- [33] Arbib, A. M.: From cybernetics to brain theory, and more: A memoir, Cognitive Systems Research, 80, pp. 83-145, 2018, doi: 10.1016/j.cogsys.2018.04.001.
- [34] Brier, S.: Finding an information concept suited for a universal theory of information, Progress in Biophysics and Molecular Biology, 119 (3), 2015, pp. 622-633, doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2015.06.018.
- [35] [https://static01.nyt.com/images/2013/05/21/science/21WEIN1\\_SPAN/21WEIN1-master1050.jpg](https://static01.nyt.com/images/2013/05/21/science/21WEIN1_SPAN/21WEIN1-master1050.jpg), 19.06.2018.
- [36] Lončarić, R.: Organizacija izvedbe graditeljskih projekata, HDGI, Zagreb, 1995.
- [37] Landa, N. L.: Kibernetika i pedagogija, dio 2., Beogradski izdavačko-grafički zavod, Beograd, 1975.
- [38] Senc, S. (priredio): Grčko-hrvatski rječnik za škole, Naprijed, Zagreb, 1988.
- [39] Babić, G.: Izazov kibernetici, Centar za društvene djelatnosti omladine RK SOH, Zagreb, 1971.
- [40] Platon: Protagora, Gorgija, ur. Vuko Pavićević, Kultura, Beograd, 1968.

## Optimized indoor positioning using graph-theory-based map matching

Matija Pauković<sup>1</sup>, Maja Stella<sup>1</sup>, Mladen Russo<sup>1</sup>

(1) Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Split, Croatia, {matija.paukovic.00; mstella; mrusso}@fesb.hr

### Abstract

The accurate and precise localization in all environments enables development of countless services and applications, from navigation and tracking to other location-based services (LBS). While outdoor LBS, considering the decade when it was introduced, is reasonably highly developed, the indoor LBS or indoor positioning services (IPS) are currently one with the most attention in the industry and academia. This paper provides an overview of indoor positioning services, technology on which it relies, and highlights future challenges to overcome. The initial experiments were conducted after implementation of our IPS solution in the closed environment and, considering the use of only raw fingerprint method as one of the positioning methods, initial results indicated the necessity for further correctional measures. Based on the conclusions, our experimental graph-theory-based map matching approach is proposed which is expected to introduce a corrective measure to the fingerprint method optimizing the localization accuracy and the localization process in general.

*Keywords: indoor positioning, fingerprint, map-matching, graph theory*

### Optimizirano pozicioniranje u zatvorenim prostorima temeljeno na mapiranju putanje pomoću teorije grafova

#### Sažetak

Točno i precizno lociranje u svim okruženjima omogućuje razvoj beskrajnog broja usluga i aplikacija, od usluga navigacije i praćenja do drugih lokacijski ovisnih usluga (engl. *location-based services* (LBS)). Dok je vanjska LBS tehnologija, s obzirom na desetljeće kad je razvijena, razumno visoko razvijena, LBS tehnologija s primjenom u zatvorenim prostorima trenutno je jedna od onih s najvećom pozornošću i industrije i akademske zajednice.

Ovaj rad prezentira pregled IPS tehnologije, tehnologija na kojima se temelji te naglašava izazove koje mora svladati. Inicijalna testiranja našeg rješenja su provedena unutar eksperimentalnog okruženja i korištenjem osnovne fingerprint metode, početni su rezultati upozorili na nužnost korektivnih mjera. Na osnovi zaključaka predložen je, naš pristup temeljen na mapiranju putanje koristeći teoriju grafova kojim se očekuje optimiziranje fingerprint metode te poboljšavanje cjelokupnog procesa lokalizacije.

*Ključne riječi: pozicioniranje u zatvorenim prostorima, fingerprint, mapiranje putanje, teorija grafova*

## **1. Introduction**

The accurate and precise location of an individual, in all environments, opens an interminable area of application and usage. The outdoor LBS technology is being developed since the 1960s and it completely changed the localization, navigation and tracking services [1]. The indoor positioning services (IPS) or indoor location-based services (ILBS), has the ultimate goal to correctly, precisely and unambiguously locate, navigate and track an individual in closed environments using fewer resources possible considering time, energy, etc. Today's IPS technology, with respect to accuracy and resource requirements, rely either on infrastructure or infrastructure-free solutions [1]. Infrastructure solutions require implemented infrastructure in the form of tags or other devices, which are dedicated for localization purposes. Infrastructure-free solutions do not require any form of dedicated infrastructure but rely solely on the Signals-of-Opportunity (SOOP), or, use of any signals within the environment which are not normally intended for localization [2]. Such signals are TV, radio broadcast signals, cellular network signals and, one of the most used, Wi-Fi signals with optional further fusions to other available signals such as from Inertial Measurement Unit (IMU) and other. The random nature of SOOP and its weak and uncertain correlation with person's position/location requires the use of mathematical and algorithmic techniques to filter, to fuse with other signals, and ultimately, to stabilize and raise the correlation between measurement and estimated location [1].

The intention of this paper is to provide an overview of our IPS experiment currently being conducted within an experimental environment. Also, the intention is to present current results, conclusions and, most importantly, to provide an overview of our new approach - graph-theory-based map matching which is being developed with the aim to improve current results and IPS in general.

## **2. Related work**

Frattasi and Della Rosa in [1] provide a highly comprehensive overview of a mobile positioning and tracking technology and related issues presenting very thorough fundamentals, basics, methods, techniques in all relevant technologies such as used for positioning, navigating and tracking applications.

He and Chan in a highly cited article [3] provide an overview of recent advances in two of major areas of Wi-Fi fingerprint-based indoor localization: advanced localization techniques and efficient system deployment presenting the issues how to make use of temporal or spatial signal patterns, user collaboration, etc. Also, a study and comparisons are provided with future projections and expectations.

Lin, Chen, Deng, Hassan and Fortino in [4] propose a novel localization method (LNM) approach that utilizes the neighbor relative received signal strength to build the fingerprint database and adopts a Markov-chain prediction model to assist positioning. Very thorough experiments were conducted on a heterogeneous set of different mobile devices to express very promising results comparing to other localization algorithms.



Della Rosa, Nurmi, Pelosi, Laoudias, and Terrezza in [5] present the negative impact of different mobile device hand-grip and human body presence and orientation to received signal strength (RSS) measurements when indoor localization is conducted. The results confirmed that such factors cannot be neglected and must be considered as highly influential.

Gilliéron, Spassov, and Merminod in [6] present an enhanced indoor navigation approach incorporating map-matching techniques and using their own Personal Navigation Module (PNM) consisting of GPS receiver and, most importantly, IMU, which provides the information of person's movement from accelerometer, gyroscope and magnetometer. Dead Reckoning localization is utilized incorporating the map-matching techniques.

Wilk and Karciarz in [7], except providing an overview of map-matching techniques, presents an approach fusing a Wi-Fi positioning technique, Dead Reckoning (IMU-based) technique, and map-matching techniques. The results of the experiment provided smoother and natural user transitions within closed space but further areas of improvements were noticed.

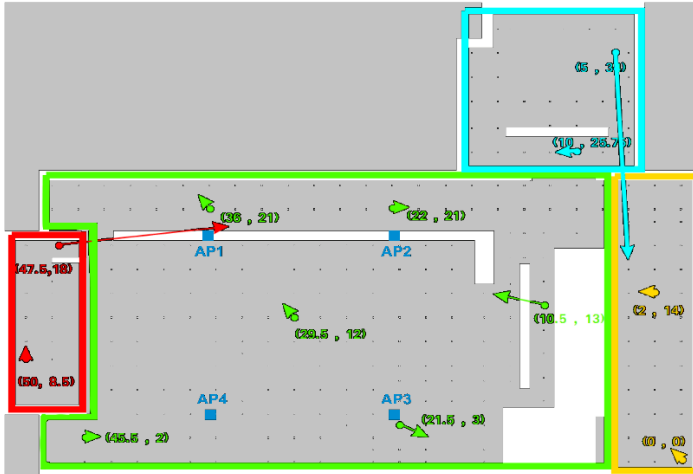
Magiera in [8] presented an approach using IMU-sensors and Dead Reckoning and using a map-matching algorithm with a function to map (place) a user's trajectory to a map (floorplan) by detecting the collisions between trajectory and the walls finding the best fit of the trajectory. The results showed a successful matching but with a highlighted time consumption.

### **3. Model and methodology**

The intensive research in the area of IPS provided several empirical approaches for indoor positioning/localization. A plethora of IPS methods were adopted and tested for WLAN infrastructure and mobile station (MS) localization [1] [3]. Whether the MS is sending probe requests to the surrounding Access Points (APs) or only receiving beacon frames periodically sent from the APs, further steps of positioning rely on the specific information extracted from those [1]. For the purpose of this work, the method using beacon frame reception is used and the Received Signal Strengths (RSS) reported in decibel-milliwatts (dBm) is measured from all the surrounding APs which is used for distance estimation [1] [3]. The fingerprint method consists of two phases. The training phase (also called offline or calibration phase) where multiple samples of RSS of all surrounding APs are recorded and averaged on the grid of known locations within the closed space and stored to a Fingerprint Database (FD). The second phase is the test phase (also called the online phase or localization phase) where the samples of RSS on the unknown location are recorded and compared with those in the FD. Estimated position is then calculated using one of the nearest neighbor (NN), k-nearest neighbors (kNN), weighted kNN or Support Vector Machine (SVM) methods.

The experimental environment (closed space) which configuration is shown in Figure 1, is consisted of four rooms (Green, Red, Blue, and Yellow room). The Green room dimensions are approximately 37 m x 25 m, the Red room is 5 m x 14 m, Blue room 13.1 m x 14.3 m and the Yellow rooms is 5.9 m x 25 m.

The APs which are used for this method are D-Link DIR510L AC750 placed in the Green room on the marked positions in Figure 1 and do not use any global synchronization but only its own distributed synchronization where beacon frame configuration and the broadcast period is according to the default settings.



**Figure 1.** The experimental space (IPS area) with expected and raw estimated positions

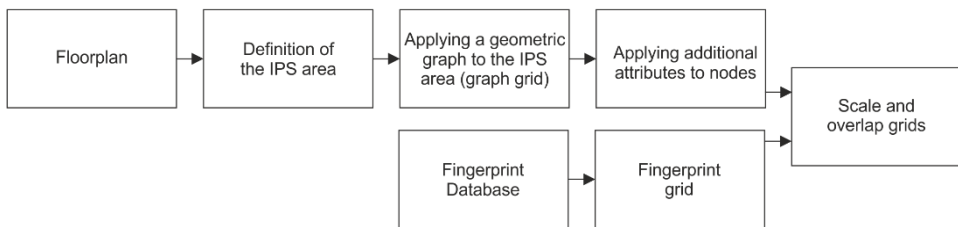
The highly random nature of Wi-Fi wave propagation, the heterogeneity of network interfaces (NICs) in the MSs, different interpretations of the RSS by different NICs, the configuration and the period of periodical beacon frames are some of the factors which directly affects to the localization accuracy and precision [1] [3] [4].

Experimental testing using only raw fingerprint localization was conducted. The known testing positions coinciding with the start of the arrow are placed on Figure 1. The tips of the arrows showed also in Figure 1, are showing the estimated raw positions. The length of the arrows is presenting the localization error. The conclusion of this experiment is that the results of using only of raw fingerprint method are relatively inaccurate, unpredictable, varying and highly depended not only on the mentioned factors, but also on the space configuration, the APs placement, the surrounding materials, the line-of-sight (LOS) to the APs, indicating that correctional filtering, fusing and other mathematical and algorithmic methods have to be applied. With the reasonable necessity to improve the localization accuracy, the experimental graph-theory-based map-matching concept was introduced which is currently being under development. The intention with the proposed approach is to apply an additional correction measures to a raw estimated positions and movement trajectory, and to examine if such trajectory can be fitted to a floorplan or a specific sequence of rooms that individual has visited and to evaluate if the next positions or, at least, rooms, can be predicted therefore optimizing further localization process. Such a concept requires the introduction of graph theory, map-matching techniques and other steps to satisfy the intended requirements.

Map-matching is the technique very well known in outdoor localization and navigation technology and it consists of methods with which estimated positions and movement

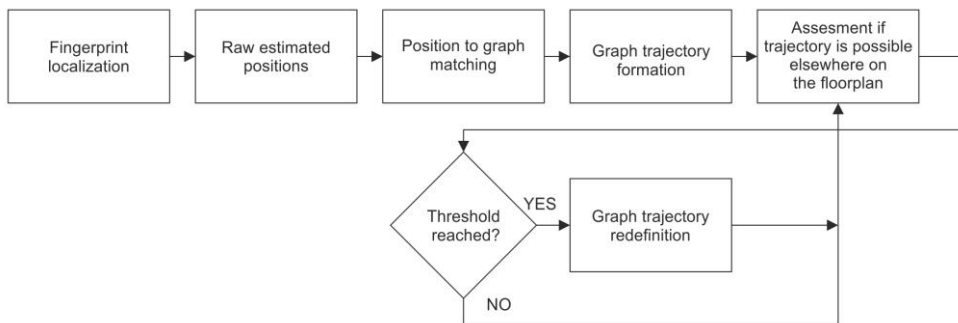
trajectories are fitted to or attached-to a more logical and structured model, mostly used, graph grid allowing additional mathematical and other operations [6] [7] [8] [9].

The first step in the approach is to apply a high-definition, but flexible considering the resolution or the number of nodes, to an IPS area of the experimental environment and place it within the Euclidian plane where all nodes of the graph have its own coordinates. Except for the node coordinates, each node has an additional attribute in the form of a number which indicates possible directions towards neighboring nodes. Most of the nodes have the link to other eight neighboring nodes but those close to walls and corners have a smaller number of possible links limiting possible hops in certain directions. After geometric graph is applied to the IPS area, fingerprint grid, as a set of known locations with averaged RSSs, also must be placed within a Euclidian plane, scaled and overlapped with the graph grid plane coinciding the plane origins. The overlapping procedure has to be conducted only once, except in the case if the number of graph nodes is changed. The process is shown in Figure 2.



**Figure 2.** Block diagram of graph and fingerprint grid overlapping procedure

The second step in the concept is the process which is conducted simultaneously with the fingerprint localization procedure, and it consists of several steps (Figure 3).



**Figure 3.** Block diagram of simultaneous map-matching

Raw estimated positions are mapped to a geometric graph by either one of the most known methods: Point-to-point (P2P) or Point-to-Curve(Link) (P2C) [6]. The P2P method is based on a calculation of Euclidian distances from neighboring nodes and selection of the closest one. The P2C method is based on the calculation of the distance to a closest neighboring link. Next step within the process is to connect all the mapped nodes on the graph using

Shortest-path-problem forming a trajectory (path) seen as a specific sequence of neighboring graph nodes [10]. After the graph trajectory formation, assessment if such trajectory is possible elsewhere on the floorplan is conducted by finding all other exact sequences on the graph.

For very simple sequences, it is expected to have a high number of matchings elsewhere on the floorplan. In the other hand, if the sequence is longer and with a specific geometric feature, it could be fitted, if not only in one, then, in few other places narrowing the possible area for further localization from entire map to a specific area where the user is expected to be. Also, the current trajectory is redefined by leaving only last few nodes closest to the last one in the sequence, and “forgetting” the ones closest to the beginning. By this, it is taken into consideration that the user could visit previously already visited positions and allowing the algorithm to work with a simplified sequence.

#### **4. Conclusion**

After implementation of our solution inside an experimental environment, the results showed the necessity for further correctional procedures which could improve the fingerprint localization. By introduction of an experimental graph-theory-based map-matching concept, the complex problem of localization is presented within a very familiar area of mathematics - graph theory, allowing the use of broad sets of methods and techniques. Considering the expected benefits, the most highlighted one is that this approach will allow localization in a narrowed area of possible locations excluding the unexpected (impossible) ones. Also, the efficiency of the approach is expected to be higher in more complex floorplans than in the less complex ones.

#### **5. Acknowledgment**

This work has been fully supported by the Croatian Science Foundation under the project number UIP-2014-09-3875.

#### **References**

- [1] Frattasi, S., Della Rosa, F.: *Mobile Positioning and Tracking*, Second edition, IEEE Press, Wiley, 2017.
- [2] Yang, C.: *Signals of Opportunity for Positioning*, ION Southern California Section, 2011
- [3] He, S., Chan, S.-H. G.: *Wi-Fi Fingerprint-based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons*, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, DOI: 10.1109/COMST.2015.2464084
- [4] Lin, K., Chen, M., Deng, J.: *Mohammad Mehedi Hassan, and Giancarlo Fortino: Enhanced Fingerprinting and Trajectory Prediction for IoT Localization in Smart Buildings*, *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING*, 2016.
- [5] Della Rosa, F., Xu, L., Nurmi, J., Pelosi, M., Laoudias, C., Terrezza, A.: *Hand-Grip and Body Loss Impact on RSS Measurements for Localization of Mass Market Devices*, *IEEE*, 2011, 978-1-61284-4577-0188-7/11/\$26.00

- [6] Gilliéron, P.-Y., Spassov, I., Merminod, B.: Indoor navigation enhanced by map-matching, *European Journal of Navigation*, Volume 3, 2005.
- [7] Wilk, P., Karciarz, J.: Optimization of map matching algorithms for indoor navigation in shopping malls, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, October 2014, 978-1-4673-8054-6/14/\$31.00 ©2014 IEEE
- [8] Magiera, J.: MATCHING TRAJECTORY OF A PERSON TO A MAP IN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM, *SCIENTIFIC JOURNAL OF POLISH NAVAL ACADEMY*, 2015, DOI: 10.5604/0860889X.1187600
- [9] Wikipedia: Map-matching, [https://en.wikipedia.org/wiki/Map\\_matching](https://en.wikipedia.org/wiki/Map_matching), edited: 27.5.2018
- [10] Sedgewick, R.: *Algorithms*, Princeton University, Addison-Wesley Publishing company, 1992.



## Primjena terestričkog laserskog skenera u ispitivanju nadzemnih metalnih spremnika nafte prema američkoj normi API 653

Josip Peroš<sup>1</sup>

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

### Sažetak

Terestričko lasersko skeniranje relativno je nova metoda koja nam pruža mogućnost globalne pokrivenosti objekta od interesa mjerenjima naspram klasičnih geodetskih metoda, poput snimanja mjernom stanicom s kojima se određuju diskretne točke na objektu. Takva vrsta snimanja ima sve veću primjenu u industriji nafte, gdje se javlja potreba za određivanjem stvarnog stanja nadzemnih spremnika sukladno specifikacijama u normi API 653. U radu su uspoređeni podaci mjerenja imperfekcija nadzemnog spremnika nafte terestričkim laserskim skenerom s testnim slučajevima koji predstavljaju mjerenja klasičnim geodetskim metodama. Usporedbom podataka između kontrolnog slučaja, koji sadrži veliku gustoću podataka mjerenja, i testnih slučajeva, dobivene su razlike statističkih podataka do iznosa od 44 mm, što je znakovito odstupanje od stvarnog stanja. Usporedba podataka mjerenja pokazala su da se korištenjem klasičnih geodetskih metoda mjerenja, usprkos tome što one zadovoljavaju uvjete propisane normom API 653, ne mogu detaljno prikazati sve imperfekcije spremnika i može doći do smanjenja iznosa pojedinih imperfekcija.

*Ključne riječi: nadzemni metalni spremnik, terestrički laserski skener, norma API 653*

### Application of terrestrial laser scanner in aboveground metal storage tank testing according to API – 653

### Abstract

Terrestrial laser scanning is a relatively new method that enables us to obtain a global coverage of objects with measurements opposite to classic surveying methods that measure only discrete points on the object. There is an increase of application of terrestrial laser scanning in the oil industry, where there is a need to determine the state of aboveground storage tanks in accordance with the standard API 653. In this paper comparisons were made between imperfection measurement data with the terrestrial laser scanner and test cases, which represent discrete measurements obtained by using classic surveying methods. Comparison between the control case, which contains a high density of measurements, and test cases shows a discrepancy between the statistics up to 44 mm,

which is a significant difference. Data comparison shows that using classic surveying method, even when they are in accordance with standard API – 653, can result in lacking data that doesn't show the full extent of the imperfections.

*Keywords: above ground metal storage tank, terrestrial laser scanner, standard API - 653*

## **1. Uvod**

Osnova korištenja prirodnih resursa kao što su tekući ugljikovodika (nafta) su postrojenja koja omogućuju njihovu preradu, skladištenje i transport. U svijetu kao standard izgradnje i ispitivanja nadzemnih metalnih spremnika koriste se američke norme API 650 i API 653. Norma API 650 definira minimalne uvjete za izgradnju i korištenje nadzemnog spremnika, a norma API 653 definira postupak inspekcije postojećih nadzemnih spremnika. Dio inspekcijskog postupka prema normi API 653 temeljen je i na geodetskim mjerenjima slijeganja i deformacija plašta spremnika. Samom normom nije detaljno definiran postupak mjerenja, nego su dane okvirne smjernice što treba mjeriti i koliko gusto trebaju biti raspoređeni podaci mjerenja. Uslijed neoptimalnog rasporeda mjerenja, kod velikih imperfekcija spremnika može se dogoditi da iznosi imperfekcije, određeni na temelju mjerenja, budu manji nego što u stvarnosti jesu. Takav slučaj bit će prikazan i u sklopu rada. Terestričko lasersko skeniranje omogućuje pokrivanje cijelog spremnika s podacima veće gustoće od mjerenja po cm<sup>2</sup>. Takvim načinom rada i obrade podataka smanjuju se izgledi da iznos pojedinog pomaka bude umanjen i dobiva se cjelokupna informacija o stanju spremnika.

## **2. Norme API 650 i API 653**

Norme API 650 i API 653 su američke norme kojima se definiraju standardi i propisi za izgradnju i upotrebu nadzemnih metalnih spremnika.

Norma API 650 definira minimalne zahtjeve za materijale, oblik, izgradnju i inspekciju vertikalnih, cilindričnih, nadzemnih, otvorenih i zatvorenih, varenih spremnika različitih dimenzija i kapaciteta unutarnjeg tlaka koji odgovara atmosferskom tlaku. Ako se zadovolje dodatni uvjeti, dopušta se i veći unutarnji tlak od atmosferskoga. Norma se odnosi samo na spremnike čiji su temelji jednoliko poduprti i na nerashladne spremnike, čija maksimalna radna temperatura ne prelazi 93 °C [1].

Norma API 653 definira standarde koji obuhvaćaju čelične spremnike s određenim udjelom ugljika i manjim udjelom drugih legura, a koji su izgrađeni prema normi API 650. Norma definira minimalne zahtjeve za održavanje strukturalnog integriteta varenih ili zakovicama spojenih, nerashladnim, s atmosferskim unutarnjim tlakom, nadzemnim spremnicima nakon što su pušteni u uporabu. Normom se definira održavanje, inspekcija, popravci, promjene, premještanje i rekonstrukcija takvih spremnika [2].

Bitna stavka u normi API 653 je definiranje rasporeda mjerenja na spremnicima kroz izrazom u poglavlju 12.5.1.2:

$$N = \frac{D}{10[ft]} \quad (1)$$



gdje  $N$  predstavlja minimalni broj mjerenja slijeganja po obodu plašta spremnika, gdje taj broj ne smije biti manji od 8. Kod zaokruživanja se uvijek zaokružuje na veći broj i udaljenost po obodu ne smije biti veća od 32 stope (9.75 m), a  $D$  je promjer spremnika izražen u stopama. Broj mjerenja po visini spremnika nije striktno definiran normom i potrebno ga je usuglasiti s investitorom prije početka mjerenja.

### 3. Terestričko lasersko skeniranje

Terestričko lasersko skeniranje je relativno nova tehnologija mjerenja (pojavi se tek krajem devedesetih godina dvadesetog stoljeća) koja se pored već tradicionalnih metoda u geodeziji kao što su tahimetrija, fotogrametrija i GNSS, koristi kao metoda dobivanja koordinata traženih točaka u 3D prostoru [3]. Instrumenti koji odašilju, prema unaprijed zadanom razmaku, niz laserskih impulsa kako bi izmjerili udaljenost te horizontalni i vertikalni kut do pojedine točke prostora, nazivaju se terestrički laserski skeneri. Oni služe za bezodirno prikupljanje podataka u veoma kratkom vremenskom razdoblju te naknadnu obradu podataka za modeliranje i vizualizaciju objekata [4]. Izmjereni objekt je prekriven velikom količinom detaljnih točaka te prepoznatljivi dijelovi objekta, kao što su rubovi kuće i ostali detalji, nisu direktno snimljeni, već su prikupljeni u oblak točaka (eng. *point cloud*). Rezultat laserskog skeniranja je oblak točaka koji predstavlja gusti točkasti prikaz vanjske površine izmjenjenog objekta. Dakle, laserskim skeniranjem dobije se digitalna snimka objekta koja je predstavljena skupom točaka u 3D prostoru. Spajanje oblaka točaka moguće je ako je isti objekt snimljen više puta s različitih stajališnih točaka te se naknadnom obradom, tj. spajanjem identičnih točaka unutar oblaka točaka i modeliranjem, dobivaju već poznati geometrijski oblici. Tako su omogućena različita mjerenja i izračuni elementa objekta [5].

Laserskim skeniranjem postiže se globalna pokrivenost mjerenjima umjesto rijetke mreže diskretnih točaka. Oblaci točaka mogu se jednostavno modelirati u plohe s pravilnim ili nepravilnim rasporedom točaka što omogućuje definiranje lokalnih deformacijskih pojava koji bi bili preskočeni u slučaju korištenja klasičnih geodetskih metoda [6].

## 4. Metodologija rada

### 4.1. Prikupljanje podataka

Podaci mjerenja korišteni u radu preuzeti su iz stručnog projekta izmjere postojećeg stanja nadzemnog metalnog spremnika nafte na lokaciji u luci Ploče. Zbog privatnosti, detaljni podaci o samom spremniku i investitoru neće biti navedeni u radu. Za potrebe izmjere i dovođenje podataka mjerenja u apsolutne koordinate postavljena je geodetska mreža od 8 geodetskih stabiliziranih točaka. Postupak mjerenja i korišteni instrumentarij s pripadajućom opremom odabrani su i prilagođeni u svrhu postizanja što bolje preciznosti mjerenja. Precizna geometrija spremnika određena je korištenjem terestričkog laserskog skenera FARO Focus 3D X130. Cjelokupna geometrija spremnika snimljena je s ukupno 9 stajališta (skenova). Za međusobno i relativno orijentiranje skenova korištene su orijentacijske markice i kugle.

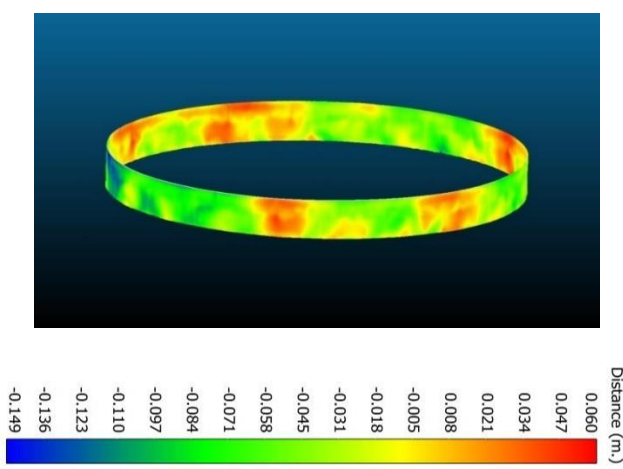
**Tablica 1.** Osnovne specifikacije skenera FARO Focus 3D X130

Maksimalni domet	130 m
Brzina snimanja	122.000/244.000/488.000/976.000 točaka/s
Preciznost mjerenja	2 mm
Šum mjerenja	0.15 mm na 25 m

## 4.2. Obrada podataka

Prvi korak obrade podataka sastojao se od izjednačenja mreže stabiliziranih geodetskih točaka na temelju podataka mjerenja. Mreža je izjednačena u horizontalnom i visinskom smislu korištenjem programskog paketa Columbus 3.8D. Rezultat izjednačenja je relativna, precizna i homogena mreža geodetskih točaka koja služi kao osnova svih daljnjih mjerenja s odstupanjima unutar 2 mm položajno i 1 mm visinski.

Podaci laserskog skenera obrađeni su korištenjem programskog paketa Faro Scene. Stajališta skenera izjednačena su po metodi najmanjih kvadrata u Faro Scene programskom paketu. Rezultat obrade je oblak točaka spremnika s približno 403 milijuna točaka s preciznosti određenih koordinata od  $\pm 2$  mm. Prije daljnje upotrebe, oblak točak je pročišćen korištenjem programskog paketa CloudCompare 2.9 [7]. Cilj čišćenja bio je ukloniti sve nepotrebne objekte iz skenova, kao što su ljestve, cijevi, itd. kako bi ostali samo podaci o geometriji plašta spremnika. Konačni proizvod za obradu su dva oblaka točaka, od kojih je jedan vanjski plašt spremnika, a drugi unutrašnji plašt spremnika. Obrada podataka sastoji se od usporedbe referentnih cilindara s odgovarajućim oblacima točaka vanjskog i unutrašnjeg plašta korištenjem algoritma *Surface of Revolution Analysis*. Tako su određeni iznosi imperfekcija plašta spremnika i klasificirani po bojama prema udaljenosti gdje plava boja prikazuje imperfekcije unutar promjera cilindra, dok crvena boja prikazuje odstupanja izvan promjera cilindra (Slika 1).



**Slika 1.** Klasificirani prikaz imperfekcija unutrašnjeg plašta spremnika i pripadajuća skala boja

Budući da ne postoje prethodni geodetski podaci o izvedenom stanju spremnika za daljnje radove i usporedbe, koristit će se dimenzije idealiziranog spremnika dobivene iz podataka mjerenja (BEST FIT kružnica), jer se smatralo da bolje opisuju stvarno/trenutačno stanje spremnika od dobivenih podataka iz tehničkog opisa. Preciznost određivanja promjera cilindra (odstupanje izmjenjenih točaka od idealne kružnice određene BEST FIT funkcijom) iznosi  $\pm 7.6$  mm, što je zadovoljavajući podatak s obzirom na to da ulazna preciznost mjerenja iznosi  $\pm 2$  mm i sam spremnik, uslijed deformacija, ne odgovara više obliku idealne kružnice. Za sve naredne usporedbe unutar softvera CloudCompare 2.9 definirani su idealni referentni cilindri promjera  $D=42.682$  m i  $D=42.662$  m, s identičnim središtima i visinom  $H=7.340$  m koji će se koristiti za usporedbe podataka vanjskog dijela plašta i unutrašnjeg dijela plašta spremnika

### 4.3. Usporedba podataka

U sklopu rada bit će uspoređeni statički podaci (minimum, maksimum i aritmetička sredina) imperfekcija unutrašnjeg plašta u pet slučajeva. U prvom kontrolnom slučaju koristit će se podaci svakih  $0.25^\circ$  po obodu i 1 cm po visini. Prvi slučaj će biti korišten kao kontrolni slučaj za usporedbu preostalih. U naredna četiri slučaja koristit će se gustoća podataka koja zadovoljava minimalne uvjete postavljene u normi API 653. Prema izrazu (1), broj segmenata za spremnik treba biti 15, tj. svakih  $24^\circ$  po obodu, dok su visinski podaci preuzeti za svakih 0.5 m. Slučajevi 1 - 4 koriste se kao simulacija mjerenja klasičnim geodetskim metodama, u ovome slučaju preciznom mjernom stanicom. Smjer sjevera definiran je kutnim iznosom  $0^\circ$ . Testni slučajevi imaju svoja ishodišta ( $0^\circ$ ) pomaknute od smjera sjevera za iznose od  $0^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $16^\circ$  i  $20^\circ$  u smjeru kazaljke na satu. Izračunati rezultati imperfekcija po pojedinim slučajevima prikazani su u Tablici 2. Njihova međusobna odstupanja prikazana su u Tablici 3.

Tablica 2. Iznosi imperfekcija po slučajevima

	SVI PODACI	SLUČAJ 1 Ishodište $0^\circ$	SLUČAJ 2 Ishodište $12^\circ$	SLUČAJ 3 Ishodište $16^\circ$	SLUČAJ 4 Ishodište $20^\circ$
Iznos najveće pozitivne imperfekcije (ispupčenja)	0.052 m	0.041 m	0.035 m	0.031 m	0.034 m
Iznos najveće negativne imperfekcije (udubljenja)	-0.159 m	-0.142 m	-0.140 m	-0.115 m	-0.135 m
Aritmetička sredina iznosa imperfekcija	-0.037 m	-0.039 m	-0.037 m	-0.039 m	-0.035 m

**Tablica 3.** Odstupanja određenih imperfekcija između slučajeva

Standardno odstupanje iznosa najvećih pozitivnih imperfekcija	0.008 m
Standardno odstupanje iznosa najvećih negativnih imperfekcija	0.016 m
Najveće odstupanje iznosa najvećih pozitivnih imperfekcija	0.021 m
Najveće odstupanje iznosa najvećih negativnih imperfekcija	0.044 m

Na temelju podataka obrade podataka u Tablici 3 razvidno je da u slučajevima kada se objekt pokriva s minimalnim brojem mjerenja, broj koji zadovoljava normu API 653, može doći do znakovitog umanjenja iznosa pozitivnih i negativnih iznosa imperfekcija. Testni podaci u slučajevima 1 - 4 razlikuju se od kontrolnog slučaja, koji sadrži podatke svih mjerenja, do iznosa od 21 mm za pozitivne imperfekcije i 44 mm za negativne imperfekcije. Aritmetičke sredine podataka ne pokazuju značajne razlike i nisu dalje uzete u razmatranje.

## 5. Zaključak

Terestričko lasersko skeniranje ima sve veću primjenu u geodetskim poslovima, što uključuje i inženjersku geodeziju koja se primjenjuje u industrijskim postrojenjima. Jedna od glavnih karakteristika te metode je globalna pokrivenost objekta mjerenjima. Takvim načinom rada uvelike se nadmašuju zahtjevi za ispitivanje stanja spremnika definirani američkom normom API 653. Testni podaci pokazali su da minimalna gustoća podataka mjerenja prema normi nije dovoljna da pruži detaljan uvid u postojeće stanje spremnika. Također u slučaju nepovoljnog rasporeda podataka mjerenja, može doći do prikrivanja iznosa imperfekcija. Testni su slučajevi pokazali odstupanja od kontrolnog mjerenja do iznosa od 21 mm za pozitivne imperfekcije i 44 mm za negativne imperfekcije. Korištenjem terestričkih laserskih skenera i njihovih podataka mjerenja naspram korištenja klasičnih geodetskih metoda (mjerna stanica), pruža se mogućnost uvida u cjelokupno stanje spremnika i stvarne iznose imperfekcija na temelju kojih se mogu raditi projekti sanacije i rekonstrukcije. Samo vrijeme mjerenja različitih metoda i preciznosti podjednaki su i ovisе o samom korištenom instrumentariju.

## Literatura

- [1] “{API} 650: Tank Design,” in A Quick Guide to {API} 653 Certified Storage Tank Inspector Syllabus, Elsevier, 2011, pp. 128–139.  
doi: 10.1533/9780857095275.128.
- [2] “An Introduction to {API} 653: 2009 and its Related Codes,” in A Quick Guide to {API} 653 Certified Storage Tank Inspector Syllabus, Elsevier, 2011, pp. 11–24. doi: 10.1533/9780857095275.11.

- [3] Mechelke, K., Kersten, T.P., Lindstaedt, M.: Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems, *Proc. Opt.*, vol. 3, pp. 19–327, 2007.
- [4] Matijević, H.: *Terestrički laserski skeneri*, 2002.
- [5] Basa, L., Juraj, I.: Oblak točkica i AutoCAD Civil 3D 2011, *Ekscentar*, no. 14, pp. 34–39, 2011.
- [6] Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M.: Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements, *Proceedings of 10th International FIG Symposium on Deformation Measurements*, 2001, pp. 23–32.
- [7] Girardeau-Montaut, D.: *Cloudcompare-open source project*, OpenSource Proj., 2011.



## Beech as construction wood

Mitja Plos<sup>1</sup>, Barbara Fortuna<sup>1</sup>, Tamara Šuligoj<sup>1</sup>, Goran Turk<sup>1</sup>

(1) University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Slovenia, {mitja.plos; barbara.fortuna; tamara.suligoj; goran.turk}@fgg.uni-lj.si.

### Sažetak

Bukva je rijetko korištena kao građevinski materijal. U posljednje se vrijeme razmatra učestalije korištenje u građevinarstvu budući da ima visoka mehanička svojstva i da je zabilježen porast zaliha - posebno u srednjoj i jugoistočnoj Europi. U radu su uspoređeni njemački, francuski i britanski standardi za vizualno ocjenjivanje skupa uzoraka iz lokalne pilane. Prema njima, relativno mali udio dasaka je ocijenjen najvišom ocjenom, a većina je dasaka negativno ocijenjena. Nakon provedenog vlačnog testa nad istim skupom dasaka, otkriveno je da daske imaju visoku vlačnu čvrstoću. Kako bi se poboljšao sustav vizualnog ocjenjivanja, korištena je metoda stabla odlučivanja. Novi sustav ocjenjivanja povoljnije je ocijenio daske nego opisane nacionalne norme.

*Ključne riječi:* Bukva, vizualno ocjenjivanje, ocjena čvrstoće, stablo odlučivanja, ocjenjivanje svojstava

## Bukva kao drvena građa

### Abstract

Beech is rarely used in construction. Due to the high mechanical properties and increase of beech stock, especially in Central and South-eastern Europe, beech wood became an interesting resource also for the construction sector. A comparison has been made of the German, French and British standard for visual grading of a sample from a local sawmill. A relatively small portion of boards was graded into the highest grades, and the majority of the boards were graded as a reject. Tension tests of the same boards revealed high strengths, and an attempt of more efficient visual grading was made. We used the decision tree method. With assessment of only three visual parameters, we were able to grade the majority of the boards into higher grades than established visual standards from Germany, France and United Kingdom.

*Keywords:* beech wood, visual grading, strength grade, decision tree, grade determining property

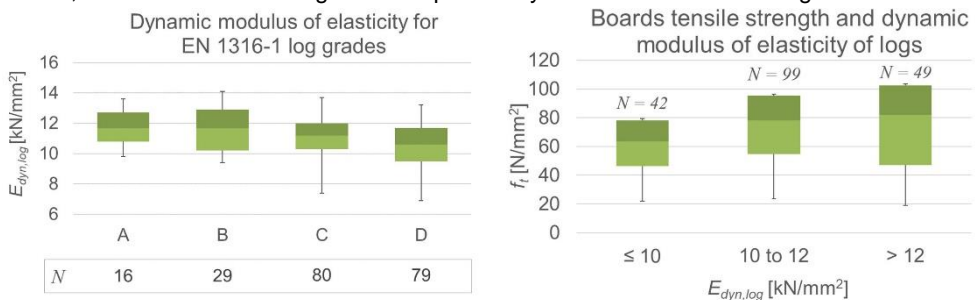
## 1. Introduction

In the countries in central Europe, including Slovenia, the stock of hardwoods is increasing. In the last twenty years, the standing stock of softwoods in Slovenia decreased by 5 % whereas the stock of hardwoods increased. Due to bark beetle outbreaks that are the most damaging agent of mature spruce forests, we can expect this trend to continue and the demand for hardwoods to rise. In 2016 hardwoods accounted for approximately 55 % of standing stock [1]. Compared to softwood, the mechanical properties values of hardwoods are higher. Despite that, hardwoods have rarely been used in the construction sector. The lack of standardisation and regulation also contributes to the limited usage of structural hardwood.

Beech is the most common wood species in Slovenia, accounting for about 32 % of the forested areas [1], hence our research focused on this species. Within the Gradewood [2] and EU Hardwood projects data for spruce, oak and beech were obtained. Beech showed a higher natural strength potential than spruce and even oak.

## 2. Material

208 beech (*Fagus sylvatica*) logs were randomly picked from a local Slovenian sawmill. The logs were visually inspected and graded into four (A – D) grades according to the EN 1316-1 standard. During visual grading, the logs' dynamic modulus of elasticity ( $E_{dyn,log}$ ) was determined through the 1<sup>st</sup> eigenfrequency of the log, using a laser vibrometer (Polytec PDV-100) to measure the vibration from a hammer impact. Although there are small differences between the  $E_{dyn,log}$  values between the different grades, a pattern can be seen where the highest (A) grades have higher values than the lower grades. Using the  $E_{dyn,log}$  values, we can allocate the logs that will potentially have a low tensile strength.



**Figure 1.** Measured dynamic modulus of elasticity for logs graded according to EN 1316-1 (left) and tension strengths of the boards with dynamic modulus of elasticity of logs (right).

## 3. Visual grading of beech boards

From each log, only one board was sawn and used for further analysis. For 191 boards out of 208 all visual parameters, defined in the German [3] and British [4] standard, were measured. The rest of the boards were either not measured correctly or lost during testing.



Some additional parameters, that are included in the French [5] standard for visual grading, were acquired only for 167 boards. The comparison between the three standards was made and is shown in Table 1.

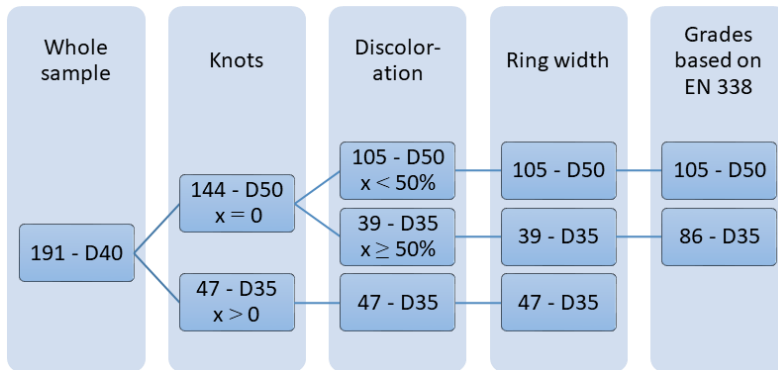
**Table 1.** Strength grade yields for visual grading according to three European standards.

Standard	D40	D35	D24	Reject
DIN 4074-5	24	10	19	114
NF B 52 001-1	31	/	17	119
BS 5756	50	/	31	86

The results show the conservativeness of all the standards. Most of the boards were graded as a reject, and in the case of the German standard little more than 10 % of the boards were graded into the highest strength grade LS 13. In the standard EN 1912 [6] the assignments to the EN 338 grades are made. LS 13 grade can be translated to the D40 (Table 1). More favourable results were obtained using the British standard where 50 boards were graded as TH1 (D40). Since coniferous wood is mostly used in construction it is logical that visual grading rules were primarily designed to the physical characteristics of softwood, mostly spruce. When a need for grading hardwood species arose, rather than creating new standards from scratch, softwood standards were adopted. Since there are fewer data available for hardwoods, hardwood standards may still be changed after sufficient data for hardwood is available.

#### 4. Decision tree method

The decision tree method was chosen in order to construct an alternative procedure for visual grading rules for beech. Decision trees are a useful way of visually displaying the problem and then organising the programming of making decisions. This approach is especially helpful if a sequence of decisions has to be made [7]. Decision trees provide a modelling technique that is easy to understand and comprehend and simplifies the classification process [8, 9]. Standards for visual grading [3, 4, 5] require measurements of multiple parameters which results in a highly time-consuming process of grading. On 191 beech boards, we measured proposed visual characteristics of the boards and evaluated their correlations with the tension strength, modulus of elasticity in bending and density. In general, the results showed the best correlation of visual parameters with tension strength. We calculated the correlation factor between tensile strength and knots, discolouration, the slope of grain and ring width, respectively. Since the slope of grain is difficult to measure, an effort was made to avoid these measurements during grading. Therefore, in the decision tree algorithm, only knots (0 or larger than 0 mm), discolouration (less or more than half of the board width) and ring width (less or more than 2 mm) were included. In the first two steps, more than half of the boards obtained the characteristic strength corresponding to a very high-grade D70 and the rest corresponded to D35 or more. There was no reject. If all grade determining properties were included, 105 boards were sorted into D50 and 86 boards into D35, still with no reject (Figure 2).



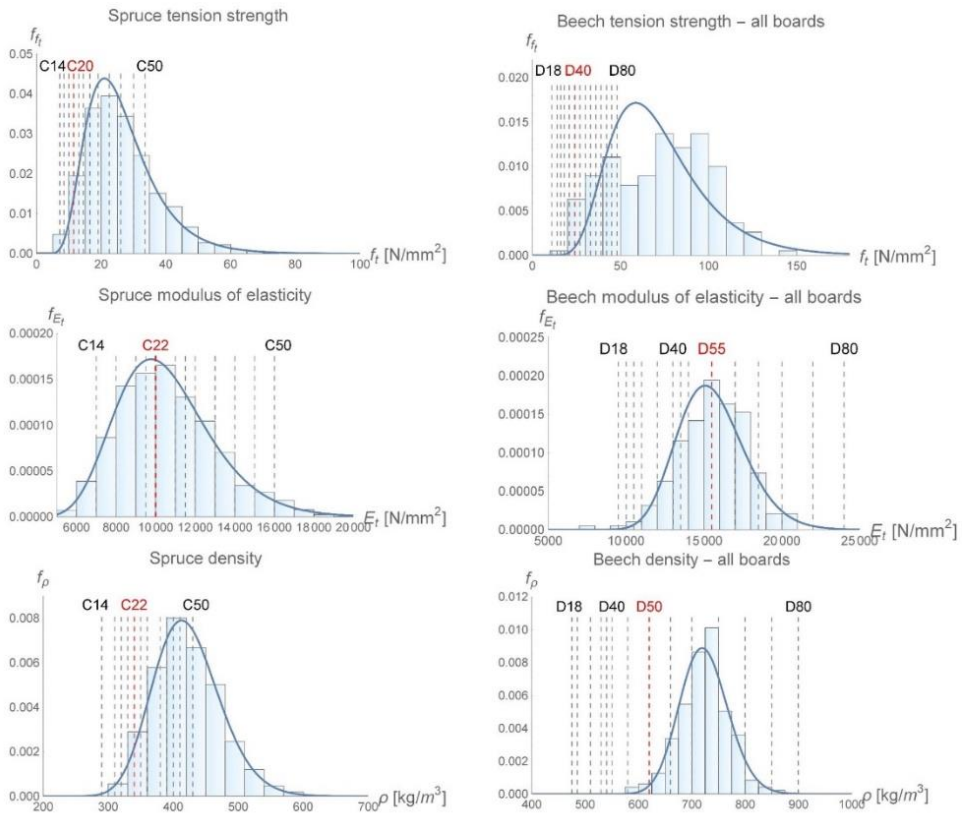
**Slika 2.** Figure 2. Decision tree algorithm results with grades based on all three grade determining properties from EN 338

The results of the decision tree approach are very encouraging. At this point, it is important to emphasise, that EN 14081-1 requires visual override for visual grading, which was not included in the decision tree algorithm. These requirements are mostly given for the feasibility of the postproduction process, i.e. features like wane, fissures, warp and rot should be limited in order to be suitable for later use. Nevertheless, we were able to recognise boards with high strength properties using only three observed visual parameters that can be determined easily and quickly. No measurements were needed.

**Table 2.** Strength grades for the grade determining properties separately and overall as a result of the decision tree algorithm

No.	$f_{t,k}$	$E_t$	$\rho$	$f_{t,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
24	D80	D55	D50	48.5	16100	626
81	D65	D55	D50	40.9	16200	647
86	D35	D50	D55	22.0	14800	662

In Table 2 grading by all three grade determining properties is presented separately. If strength would be the only grade determining property, we could allocate the boards into D80, which is the highest possible strength grade for hardwoods defined in EN 338 [10]. Although the boards had a similar density to those in other research [11, 12], it was the acting grade determining property, and it was not possible to grade into higher grades than D50. There was no single board, which would exceed the requirement for the characteristic value of the density for the highest grade.



**Figure 3.** PDF of fitted lognormal distribution for grade determining properties and requirements according to EN 338 for spruce (left column) and beech (right column) boards. Therefore, further investigation and comparison of the requirements for all the grade determining properties were made. In Figure 2, probability distribution functions (PDFs) of fitted lognormal distribution for grade determining properties together with the histograms of actual data are shown. The dashed lines illustrate the requirements for all grades. A comparison to the data of 1493 spruce boards from the Gradewood project was made [2]. Although the acting grade determining property for all boards is the strength (C20) as in the case of beech, the other two properties show just slight deviation since the characteristic values of elastic modulus and density correspond to grade C22. It is also clear that higher grades are not hindered by any grade determining property. We can see that we could grade a specific subsample of high-quality spruce to a very high grade. According to EN 338 requirements for hardwood and experimental data from our research grading of beech in higher grades (D65 and higher), it is just impossible, although the strength characteristics of beech clearly indicate that beech could be graded higher.

## 5. Conclusions

Beech shows high mechanical properties, and it has good potential as construction material. According to the current standards for visual grading, the highest possible grade that beech can be allocated to is D40. Our research proposes a method of strength grading using the decision tree algorithm. The results showed very high strength values, and if strength had been the only grade determining property, Slovenian beech would have been graded into D80 too. The requirements for the modulus of elasticity and density are stricter, and it is not possible to grade higher than D50. According to our analysis, the requirements of the standard EN 338 for modulus of elasticity and density are not in accord with the general characteristics of the mechanical properties for beech. In our opinion, additional research is required, and the grade requirements re-evaluated.

## References

- [1] Slovenia Forest Service: The Slovenia Forest Service report on Slovenian forest in 2016 (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih, za leto 2016, in Slovenian), [http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/PDF/LETNA\\_POROCILA/2016\\_Porocilo\\_o\\_gozdovih.pdf](http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/PDF/LETNA_POROCILA/2016_Porocilo_o_gozdovih.pdf), 13. 7. 2018.
- [2] Ranta-Maunus, A., Denzler, J. K., Stapel, P.: Strength of European timber, Part 2. Properties of spruce and pine tested in Gradewood project, VTT Working Papers 179, VTT Technical Research Centre of Finland, Finland, 2011.
- [3] DIN 4074-5:2008: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschnittholz, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [4] BS 5756: Visual strength grading of hardwood. Specification, British Standards Institution (BSI), London, 2007.
- [5] NF B 52-001-1/A3: Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif, Association Française de Normalisation, Paris, 2016
- [6] EN 1912:2012/AC: Structural Timber – Strength Classes – Assignment of visual grades and species, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2013.
- [7] Hillier, F. S., Lieberman, G. J.: Introduction to operations research, 7th edition, McGraw-Hill, Boston (Ma), 2001.
- [8] Utgoff, P. E., Brodley, C. E.: An Incremental Method for Finding Multivariate Splits for Decision Trees, Conference on Machine Learning, Austin, pp. 58–65, 1990, doi: 10.1016/B978-1-55860-141-3.50011-0.
- [9] Anyanwu, M. N., Shiva, S. G.: Comparative Analysis of Serial Decision Tree Classification Algorithms, Int. J. Comput. Sci. Secur., 3(3), Malaysia, pp: 230-240, 2009
- [10] EN 338: Structural timber – Strength classes, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2016.
- [11] Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., Frangi, A.: Strength grading of European beech timber for the production of GLT & CLT, Int. Network on Timber Eng. Research: Proceedings of Meeting 49, Graz, 29-44, 2016.
- [12] Frühwald, K., Schickhofer, G.: Strength grading of Hardwoods, Proceedings of the 14<sup>th</sup> Int. Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hannover, pp. 199-210, 2005.

## Primjena elektrokoagulacije u cilju smanjenja koncentracije fosfata u vodama

Hana Posavčić<sup>1</sup>, Ivan Halkijević<sup>1</sup>, Goran Lončar<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Rpublika Hrvatska, [hposavcic@grad.hr](mailto:hposavcic@grad.hr)

### Sažetak

Najčešći izvori fosfora u vodama uključuju industriju, poljoprivredu, stočarstvo i kućanske otpadne vode, a povećane količine fosfora u vodi izazivaju onečišćenje vode, smanjenje količine kisika i eutrofikaciju. Stoga je u ovom radu analizirana učinkovitost elektrokoagulacijskog uređaja sa željeznim elektrodama na smanjenje koncentracije fosfata u vodi. Na pilot uređaju provedeno je pet različitih eksperimenata u kojima su varirani različiti operativni parametri kao što su jakost struje, protok, vrijeme rada reaktora i dodatak elektrolita. Nakon 120 minuta rada reaktora, pri protoku od 0.05 l/s i jakosti struje od 5 A, koncentracija fosfata se smanjila sa 50 mg/l na 10 mg/l, a nakon 24 sata taloženja, na 2 mg/l. Pokazalo se da dodatak soli od 2 g/l ne utječe na učinkovitost uklanjanja, ali utječe na smanjenje potrošnje električne energije, a time i na smanjenje operativnih troškova procesa. *Ključne riječi: elektrokoagulacija, pilot uređaj, fosfat*

## Application of electrocoagulation to reduce phosphate concentration in water

### Abstract

The most common sources of phosphorus in water include industry, agriculture, livestock and domestic wastewaters, and the increased amount of phosphorus in water can cause eutrophication, water pollution and oxygen depletion. In this paper the efficiency of the electrocoagulation using iron electrodes was analysed in order to reduce the phosphate concentration in water. Five different experiments were conducted on a pilot device and different operation parameters were varied, such as current, flow rate, operation time and the addition of supporting electrolyte. After 120 minutes, with the flow rate of 0.05 l/s and current of 5 A, the phosphate concentration decreased from 50 mg/l to 10 mg/l, and after 24 hours of sedimentation to 2 mg/l. It was shown that the electrolyte addition does not affect the phosphate removal efficiency, but decreases electrical energy consumption, and thus, decreases operational costs of the process.

*Keywords: electrocoagulation, pilot device, phosphate*

## 1. Uvod

Industrije kao što su tvornice gnojiva, tovilišta, mesna, mliječna industrija i dr., pridonose visokim koncentracijama fosfora u okolišu [1]. Raspon koncentracije fosfora u kućanskim i industrijskim otpadnim vodama kreće se najčešće od 3 mg/l do 15 mg/l P [2]. Prema EU direktivi (91/271/EEC) [3], granična vrijednost ukupnog fosfora efluenta je u funkciji veličine uređaja za pročišćavanje i iznosi 2 mg/l P za 10 000 ES – 100 000 ES te 1 mg/l P za više od 100 000 ES.

Fosfor se u vodi nalazi u obliku soli i estera fosforne kiseline. Iz fosforne kiseline mogu nastati anorganski fosfati kao što su orto-fosfati koji potom koriste bakterije i mikroorganizme za stvaranje organskih fosfata [1].

Fosfor se iz otpadne vode može ukloniti kemijskom precipitacijom, biološkim tretmanom i/ili fizičkim tretmanom [1]. Međutim potreba za učinkovitijim postupcima dovela je do razvitka elektrokemijskih tehnologija kao što su elektrokoagulacija, elektrooksidacija i elektrodijalaza [4].

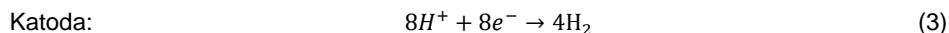
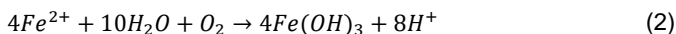
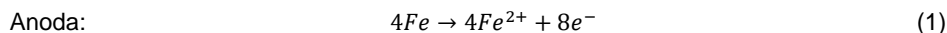
Cilj ovog rada je ispitati utjecaj operativnih parametara, kao što su protok, jakost struje i dodatak elektrolita (NaCl), na učinkovitost uklanjanja fosfata elektrokoagulacijskim procesom.

## 2. Teorija elektrokoagulacije

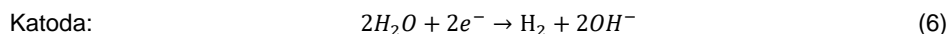
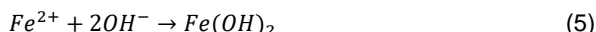
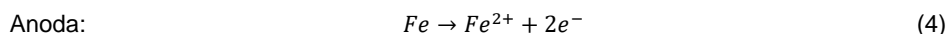
Elektrokoagulacija (EK) podrazumijeva stvaranje koagulantna upotrebom električnog polja i žrtvujućih elektroda u cilju izdvajanja, agregiranja i taloženja onečišćenja (suspendiranih čestica i otopljenih tvari) iz otpadne vode [5]. Neke od prednosti EK-a su: visoka učinkovitost uklanjanja onečišćenja, izostanak dodavanja kemikalija, prikladna je za različite vrste onečišćenja te, u usporedbi sa sličnim metodama pročišćavanja voda, proizvodi manje količine mulja i može imati manje operativne troškove [6].

Tri glavna koraka elektrokoagulacijskog procesa su: elektrolitska reakcija na površini elektrode, formiranje koagulanata u otopini i adsorpcija otopljenih i koloidnih čestica na koagulanate te uklanjanje sedimentacijom ili flotacijom. S obzirom na to da su jeftine i lako dostupne, u procesu EK-a najčešće se koriste željezne (Fe) ili aluminijske (Al) elektrode [6]. Ako se željezo koristi kao anoda, njegovom oksidacijom nastaju željezni hidroksidi  $Fe(OH)_n$ ,  $n = 2$  ili  $3$ , za čiji opis postoje dva mehanizma (jednadžbe (1), (2), (4), (5)), dok na katodi dolazi do generiranja vodika (jednadžbe (3) i (6)) [7]:

Mehanizam 1



Mehanizam 2:



$Fe(OH)_n$  se u otopini nalazi kao želatinska suspenzija koja kompleksacijom ili elektrostatskim privlačenjem, koju slijedi koagulacija, zahvaća onečišćenja iz otpadne vode. Količina generiranih flokula primarno ovisi o materijalu elektroda, vremenu rada elektroda i gustoći jakosti struje [8]. Faradayevim zakonom je definiran odnos jakosti struje  $I$  i elektrolitski generirane mase  $m$  (jednadžba 7):

$$m = \varphi \frac{It}{zF} M \quad (7)$$

gdje je:  $m$  masa metala (g),  $t$  vrijeme rada elektrode (h),  $I$  jakost struje (A),  $M$  molekularna masa Fe (g/mol),  $z$  broj transferiranih elektrona (2 za  $Fe^{2+}$  ili 3 za  $Fe^{3+}$ ),  $F$  Faradayjeva konstanta (96 487 C/mol),  $\varphi$  korekcijski koeficijent učinkovitosti elektrolitske disocijacije. Napominje se da efikasnost disocijacije može biti veća od 100 %, tj. veća od one određene Faradayevim zakonom [9].

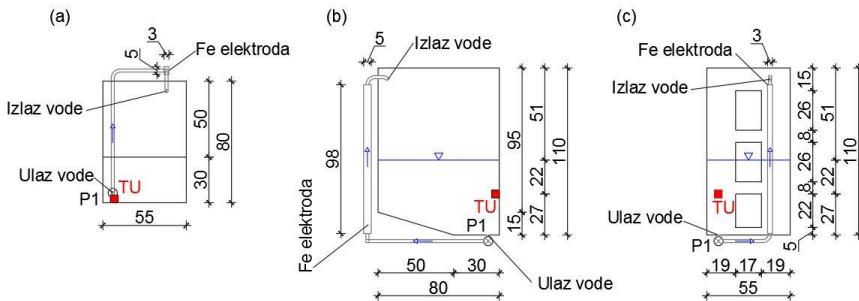
### 3. Materijali i metode

Na Slici 1 je prikazan inovativni elektrokoagulacijski uređaj hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Geometrija komore i reaktora, uključujući pozicije ponora (usisa) i izvora (unosa), prikazana je na Slici 2.



**Slika 1.** Pilot EK-a uređaja instaliran u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Cjelokupni proces pročišćavanja vode podijeljen je u nekoliko faza. Primarna komora se puni vodom iz vodoopskrbnog sustava grada Zagreba do dubine  $h = 0.49$  m (što odgovara volumenu od 180 l, Slika 2). U komoru se unosi 11.5 ml 85 %-tne fosforne kiseline  $H_3PO_4$  koja se miješa do postizanja homogene inicijalne koncentracije fosfata  $PO_4\text{-P}$  (koncentracija fosfora iskazana preko izmjerene koncentracije fosfata;  $PO_4^{3-}$  [mg/l] =  $PO_4\text{-P}$  [mg/l] x 3.06) od 50 mg/l. Za potrebe eksperimenata varirana je inicijalna koncentracija elektrolita. U eksperimentima 1, 2, 3 i 4, u otopinu se kontinuirano unosi odgovarajuća količina NaCl kako bi se postigla koncentracija od 2 g/l, dok se eksperimentom 5 ne predviđa dodatak NaCl (rezidualna koncentracija 0.2 g/l). Zatim se pokreće crpka P1 (Slika 2) kojom se ostvaruje usis vode u pridnenom sloju i njezino provođenje kroz Fe elektrode. Nakon prolaska vode kroz elektrodu s protokom 0.05 l/s i 0.3 l/s, voda se vraća na površinski sloj vode u komori na poziciji naznačenoj na Slici 2. Vrijeme rada reaktora je 30 min do 240 min, ovisno o eksperimentu. Nakon prekida rada reaktora i uzimanja uzorka, voda se ostavlja u mirovanju 24 sata (taloženje). Nakon 24 sata taloženja uzimaju se uzorci, aktivira se crpka P2 s kojom se voda prebacuje u drugu komoru i uređaj se prazni.



**Slika 2.** Shematski prikaz EK-a uređaja s naznačenom pozicijom uzorkovanja vode za mjerenje parametara kvalitete vode (TU); (a) tlocrt, (b) pogled s boka, (c) prednja strana

Uzorci vode za mjerenje koncentracija uzimaju se neposredno prije aktivacije reaktora (početno stanje), svakih 30 minuta, nakon prekida rada reaktora te nakon 24 sata taloženja. Uzorci se uzimaju na poziciji TU (točka uzorkovanja) (Slika 2). Koncentracije fosfata  $PO_4\text{-P}$  procijenjene su indikator listićima Quantofix Phosphate u rasponu od 0 do 100 mg/l  $PO_4\text{-P}$  proizvođača Macherey-Nagel. Ultrazvučni mjerač FLEXUS F601 (proizvođač Flexim) korišten je za mjerenje protoka. Jakost struje kontrolirana je laboratorijskim ispravljačem snage 900 W (MC Power LBN 1990) s rasponom jakosti struje od 0 do 60 A.

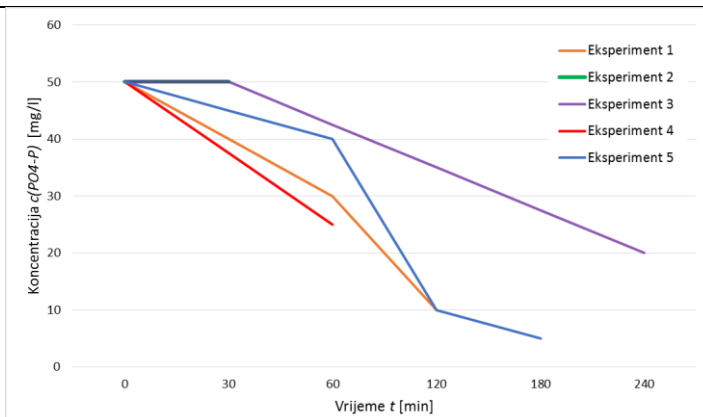
#### 4. Rezultati mjerenja

Na pilot uređaju provedeno je 5 različitih eksperimenata u cilju utvrđivanja učinkovitosti smanjenja fosfata s obzirom na različite vrijednosti procesnih parametara (protok, jakost struje, trajanje elektrolize i dodatak elektrolita, Tablica 1). Na Slici 3 su prikazane izmjerene vrijednosti koncentracije  $PO_4\text{-P}$  na poziciji TU ( $X = 8$  cm,  $Y = 0$  cm,  $Z = -22$  cm (22 cm ispod površine vodnog lica)) u uvjetima provedenih eksperimenata (Tablica 1).



**Tablica 4.** Nomenklatura provedenih eksperimenata s rezultatima smanjenja inicijalne koncentracije  $\text{PO}_4\text{-P} = 50 \text{ mg/l}$  ( $Q$  – protok kroz reaktor,  $I$  – jakost struje,  $t$  – vrijeme rada reaktora,  $S$  – koncentracija soli,  $C_0$  – inicijalna konc.  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $C_t$  – konc.  $\text{PO}_4\text{-P}$  nakon vremena  $t$ ,  $\Delta C_t$  – smanjenje inicijalne konc.  $\text{PO}_4\text{-P}$  nakon vremena  $t$ )

Eksperiment	$Q$ [l/s]	$I$ [A]	$t$ [min]	$S_{\text{NaCl}}$ [g/l]	smanjenje $\text{PO}_4\text{-P}$ [%] ( $C_0 \rightarrow C_t$ ; $\Delta C_t$ [mg/l])
1	0.05	5	120	2	80 (50 $\rightarrow$ 10.0 ; 40.0 [mg/l])
2	0.3	16	30	2	0 (50 $\rightarrow$ 50.0 ; 0.0 [mg/l])
3	0.05	2.5	240	2	60 (50 $\rightarrow$ 20.0 ; 30.0 [mg/l])
4	0.05	10	60	2	50 (50 $\rightarrow$ 25.0 ; 25.0 [mg/l])
5	0.05	5	180	0.2	90 (50 $\rightarrow$ 5.0 ; 45.0 [mg/l])



**Slika 3.** Izmjerene vrijednosti koncentracije  $\text{PO}_4\text{-P}$  na poziciji TU u uvjetima provedenih eksperimenata 1 – 5

Eksperimentom 1 ostvareno je smanjenje koncentracije fosfata od 80 % nakon 120 minuta rada reaktora (Tablica 1 i Slika 3). S druge strane, eksperimentom 2, pokazano je da povećanje jakosti struje (16 A) i povećanje protoka (0.3 l/s) te skraćivanje trajanja protjecanja kroz elektrode (30 min) ne utječe na povećanje učinkovitosti. Iz navedenog se može zaključiti da je za stvaranje flokula potreban duži rad elektroda. Eksperimentom 3 pokazalo se da smanjenje jakosti struje (2.5 A) i produljenje trajanja elektrolize (240 min) rezultira sporijim stvaranjem flokula, ali bržom adsorpcijom i taloženjem. Međutim pokazalo se da je nastalo premalo flokula te da učinak nakon 240 minuta iznosi 60 %. Eksperimentom 4, kada je jakost struje bila 10 A, dobivena je slična učinkovitost uklanjanja kao i u eksperimentu 1 kada je jakost struje bila 5 A. Interesantno je uočiti da je nakon 120 minuta, eksperimentom 5 (bez dodatka soli), dobivena ista učinkovitost (80 %) kao i eksperimentom 1. Međutim nedostatak elektrolita smanjuje provodljivost te je potreban veći napon (17 V u usporedbi s prijašnjih 5 V) kako bi jakost struje ostala ista (5 A). Ovakvo povećanje napona utječe na potrošnju električne energije, a time i na povećanje operativnih troškova procesa. Također, pokazalo se da taloženje nakon elektrolize ima značajan utjecaj na smanjenje koncentracije

fosfata. Nakon 4 sata taloženja, učinkovitost smanjenja u svim pokusima iznosila je između 80 % i 90 %, a nakon 24 sata taloženja koncentracija fosfata dodatno se smanjila na 2 mg/l (96 %), 8 mg/l (84 %), 5 mg/l (90 %), 5 mg/l (90 %) i 3 mg/l PO<sub>4</sub>-P (94 %) za eksperimente 1, 2, 3, 4, 5.

## **5. Zaključak**

U radu je ispitan utjecaj protoka, jakosti struje, početne koncentracije elektrolita i trajanja rada reaktora na učinkovitost uklanjanja fosfata PO<sub>4</sub>-P metodom elektrokoagulacije. Prema rezultatima, pri protoku od 0.05 l/s i jakosti struje od 5 A (eksperimenti 1 i 5), učinkovitost uklanjanja fosfata je iznosila 80 % nakon 120 min rada elektroda, a nakon 24 sata taloženja 96 % i 94 %. Pokazalo se da dodatak soli od 2 g/l (eksperiment 1) ne utječe na povećanje učinkovitosti uklanjanja, ali utječe na smanjenje potrošnje električne energije, a time i na smanjenje operativnih troškova procesa. Istraživanje je pokazalo kako taloženje značajno utječe na učinkovitost EK-a procesa te se zbog nedovoljno istraženog područja, preporučuje daljnja istraživanja usmjeriti na proučavanje mehanizma taloženja u cilju postizanja protočnosti cijelog procesa.

## **Literatura**

- [1] Sumi, Y.: High-level Phosphorus Removal in a Small Municipal Wastewater Treatment Plant (WWTP), Diplomski rad, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, SAD, 1999.
- [2] Sincero, G.A.: Physical-chemical Treatment of Water and Wastewater, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2003.
- [3] European Commission: Council directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment, Off. J. Eur. Union L135, pp. 40–52, 1991, doi:10.3002/1977058.
- [4] Feng, Y., Yang, L., Liu, J., Logan, B.E.: Electrochemical technologies for wastewater treatment and resource reclamation, *Environ Sci Water Res Technol*, 2 (5), pp. 800-831, 2016, doi: 10.1039/c5ew00289c.
- [5] Gardić, V.: Primena elektrohemijskih metoda za prečišćavanje otpadnih voda. Deo I - elektrodepozicija i elektrokoagulacija, *Zaštita materijala*, 48 (1), pp. 49-58, 2007.
- [6] Ozyonar, F.: Treatment of Train Industry Oily Wastewater by Electrocoagulation with Hybrid Electrode Pairs and Different Electrode Connection Modes, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 11 (2), pp. 1456-1471, 2016.
- [7] Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke, D.L.: Electrocoagulation (EC) - science and application, *J. Hazard. Mater. B*, 84 (1), pp. 29–41, 2001, doi: 10.1016/S0304-3894(01)00176-5.
- [8] Irdemez, S., Yildiz, Y.S., Tosunoglu, V.: Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes, *Separation and Purification Technology*, 52 (2), pp. 394–401, 2006, doi: 10.1016/j.seppur.2006.05.020.
- [9] Sillanpää, M., Särkkä, H., Vepsäläinen, M.: NOM Removal by Electrochemical Methods, *Natural organic matter in water : characterization and treatment methods*, 1st Edition, Butterworth-Heinemann, 2014, pp. 81-111, doi: 10.1016/B978-0-12-801503-2.00004-5.

## Pedagogical and research work on Building Information Modeling in construction management

Zoran Pučko<sup>1</sup>, Uroš Klanšek<sup>1</sup>, Nataša Šuman<sup>1</sup>

(1) University of Maribor, Faculty of Civil Engineering, Transportation Engineering and Architecture, Slovenia, {zoran.pucko; uros.klansek; natasa.suman}@um.si

### Abstract

Building Information Modeling (BIM) is an approach that is increasingly gaining ground in construction practice. It became a modern approach for managing construction projects not only in phases of design and construction preparation but also during the implementation process. A comprehensive approach, covering 3D, 4D and 5D BIM modeling, is becoming crucial for the successful realization of mentioned tasks. Therefore, students of the Faculty of Civil Engineering, Transportation Engineering and Architecture at the University of Maribor also learn about the BIM approach during their studies. Through subjects' implementation of the Chair of Construction Management, Technology and Economics, 4D and 5D BIM models are generated for actual constructions each year. As an example, the paper gives a brief review of students' work on the kindergarten facility in Pekre. The mentioned facility was also monitored during the construction within the framework of two research projects. The positive trend of BIM implementation is increasing both in the construction practice as well as in the final work of students due to greater awareness about the purpose and usefulness of such education for engagement in construction management.

*Keywords: Building Information Modeling, 4D and 5D BIM, Construction Management*

## Pedagoški i istraživački rad o informacijskom modeliranju građevina u organizaciji građenja

### Sažetak

Informacijsko modeliranje građevina (eng. *Building Information Modeling*, BIM) je pristup koji se sve više primjenjuje u građevinskoj praksi. Ne samo u fazama projektiranja i pripreme za gradnju, nego i u fazi implementacije, kao moderan pristup za praćenje te upravljanje građevinskim projektima. Sveobuhvatan pristup, koji uključuje 3D, 4D i 5D BIM modeliranje, postaje ključan za uspješnu realizaciju spomenutih zadaća. Stoga i studenti Fakulteta za građevinarstvo, prometno inženjerstvo i arhitekturu Sveučilišta u Mariboru upoznaju BIM pristup tijekom studija. Provedbom predmeta Katedre za operativno građevinarstvo se tijekom svake godine izrađuju 4D i 5D BIM modeli za realne građevine. U članku je kao primjer dan kratak pregled rada studenata za zgradu dječjeg vrtića Pekre. Spomenuti objekt se također pratio tijekom izgradnje u okviru istraživačkog projekta.

Trend implementacije BIM pristupa se povećava i u građevinskoj praksi i u završnim radovima studenata zbog sve veće svijesti o svrsi te korisnosti takve edukacije za angažman u organizaciji građenja.

*Ključne riječi: Informacijsko modeliranje građevina, 4D i 5D BIM, organizacija građenja.*

## **1. Introduction**

Building Information Modeling (BIM) is becoming more and more a standard in the AECO industry. Nowadays, BIM approach for management of building projects is already operatively used in many countries but still not generally integrated [1], [2]. Despite numerous advantages offered by BIM approach, its implementation represents a practice-based process that takes time and cost, as it requires a change in evolving procedures carried out by individual participants in construction projects. As a higher-education institution, our mission is to train students to become engineers, capable of taking on all the challenges and professionally performing all the tasks they will face in construction practice. Therefore, we adapted learning contents and included the BIM approach into several subjects. In subjects' implementation of the Chair of Construction Management, Technology and Economics, we address actual construction facilities every year, where students learn about the BIM approach. In this way, they acquire theoretical and practical knowledge from relevant subject areas and become qualified to apply comprehensive BIM approach in dealing with construction projects. At the end of the study, many students decide to connect their final work with the BIM approach [3]. In this context, this paper is demonstrating an example of 4D and 5D BIM models development for a kindergarten facility in Pekre, which was successfully conducted with students, and also an overview from two research projects, where we monitored the execution of the facility construction.

## **2. Presentation of kindergarten facility in Pekre**

The kindergarten facility is located in the local community Pekre of Municipality of Maribor, Slovenia, as shown in Figure 2.1. The object is designed in an "L" form with dimensions of 11.00 m x 17.00 m + 21.60 m x 9.80 m. The height of the building is 9.46 m on the highest part and 9.16 m on its lowest part. It represents a two-story building. The situation of the facility is shown in Figure 2.2.



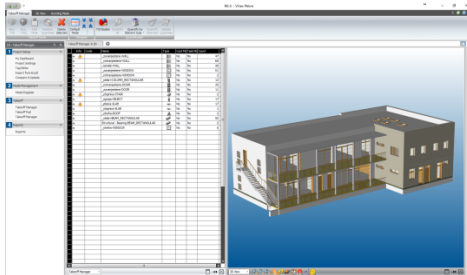
**Figure 2.1.** Location of kindergarten facility in Pekre [4]



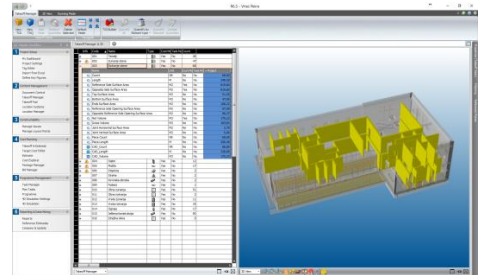
**Figure 2.2.** Situation of kindergarten facility in Pekre [5]

### 3. Development of 4D and 5D BIM models

The architectural design of the kindergarten facility in Pekre, as a 3D BIM model, was made with the modelling tool Graphisoft ArchiCAD [6]. The 3D BIM model was published into the Vico Office R6.5, which represents a Project Management Software for generation of 4D and 5D BIM models. Individual building parts were grouped into sets of construction elements for the aim of easier development of 4D and 5D BIM models, as demonstrated in Figure 3.1. In this way, we were able to obtain information about geometric characteristics for construction elements, e.g. as shown in Figure 3.2 for internal walls.

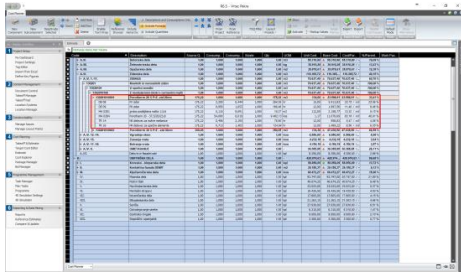


**Figure 3.1.** Sets of construction elements and 3D BIM model



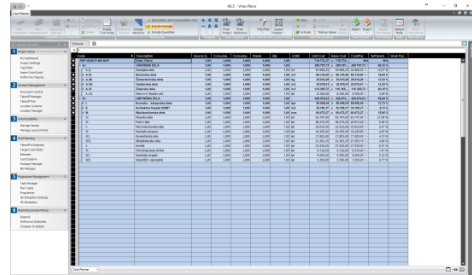
**Figure 3.2.** Geometrical characteristics for set of construction elements (internal walls)

Students were divided into several groups, where each group dealt with a single set of construction elements, taking into account the construction implementation technology. At this point, students used different study materials such as norms, price lists, standards, etc. In the module *Cost Planner/Estimate*, students entered the appropriate input data. For example, Figure 3.3 presents the price structure for building internal walls with bricks Porotherm 20 S P + E. All groups of students entered the input data in a similar way and the result was the 5D BIM model with cost information for each set of construction elements and, last but not least, the total value of project execution (Figure 3.4).



Item	Description	Unit	Quantity	Price	Total
1	Internal wall with bricks	m <sup>2</sup>	100	120	12000
2	Internal wall with bricks	m <sup>2</sup>	200	120	24000
3	Internal wall with bricks	m <sup>2</sup>	300	120	36000
4	Internal wall with bricks	m <sup>2</sup>	400	120	48000
5	Internal wall with bricks	m <sup>2</sup>	500	120	60000

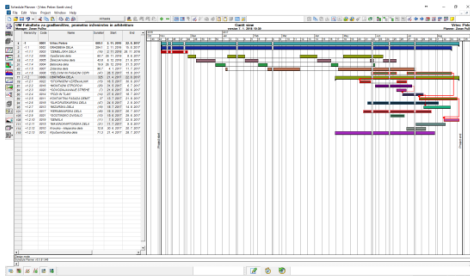
**Figure 3.3.** Price structure for building internal walls with bricks Porotherm 20 S P + E



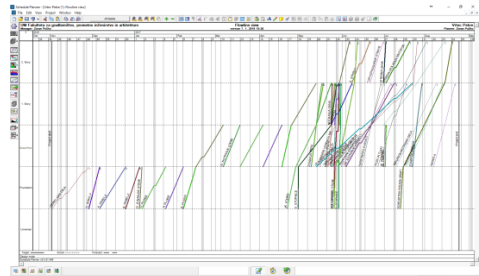
Element	Description	Unit	Quantity	Price	Total
1	Foundation	m <sup>3</sup>	100	150	15000
2	Foundation	m <sup>3</sup>	200	150	30000
3	Foundation	m <sup>3</sup>	300	150	45000
4	Foundation	m <sup>3</sup>	400	150	60000
5	Foundation	m <sup>3</sup>	500	150	75000

**Figure 3.4.** Execution costs for each set of construction elements and total value of project execution

Based on data for 5D BIM model, students subsequently generated a 4D BIM model in *Task Manager* module and *Schedule Planner* software (part of Vico Office), as shown by Figure 3.5 in Gantt view and Figure 3.6 in Flowline view.

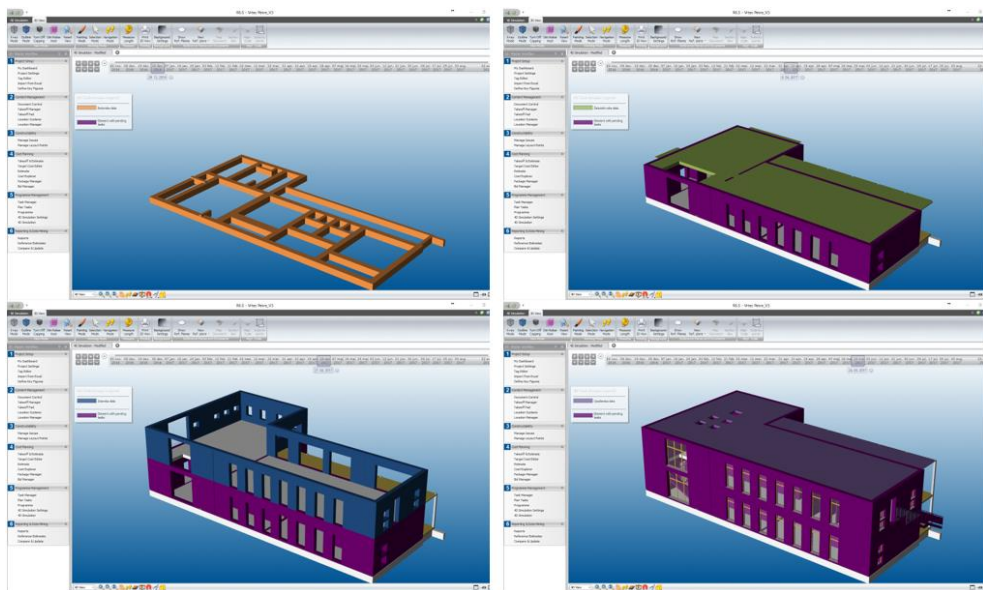


**Figure 3.5.** Schedule plan as Gantt view.



**Figure 3.6.** Schedule plan as Flowline view

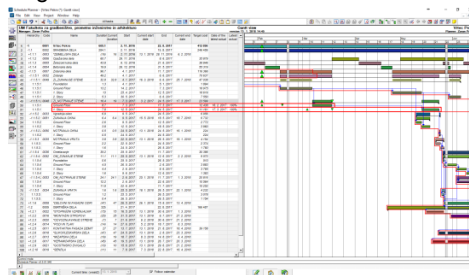
Applying the developed 4D BIM model, it was also possible to simulate the construction process as presented in Figure 3.7.



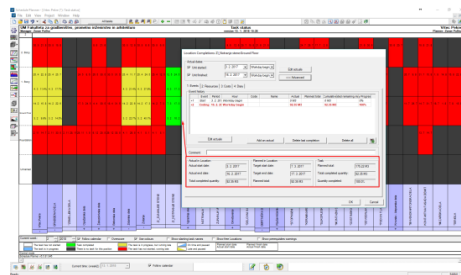
**Figure 3.7.** Simulation of construction process

#### **4. Research work with BIM approach**

As a part of the research project [7], we were monitoring the facility construction using the photo documentation obtained by interval capture of photos with LTL Acorn 6310 camera, records in the construction log and other documentation. The aim was to follow the schedule plan for individual activities. For instance, a comparison between planned and realized execution for the set of construction elements (internal walls) can be seen from schedule plan as a Gantt view given in Figure 4.1 and as a Matrix Production Control view presented in Figure 4.2.



**Figure 4.1.** Gantt view for planned and realized execution for set of construction elements (internal walls)

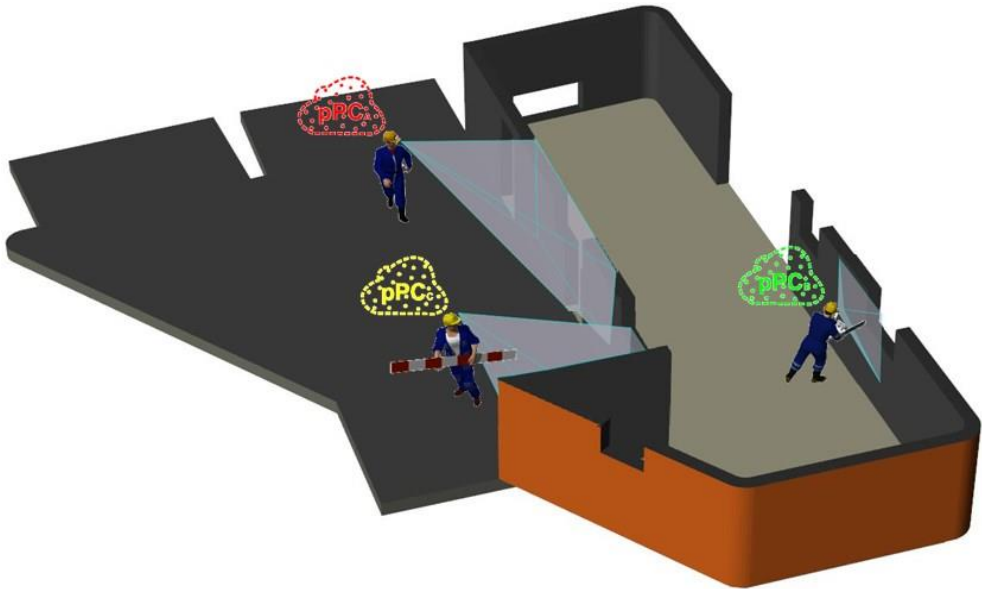


**Figure 4.2.** Matrix Production Control view for planned and realized execution for set of construction elements (internal walls)

In parallel, research (within the framework of a doctoral dissertation) intended for verification of a newly developed method called automated continuous construction progress monitoring



(ACCPM) was carried out [8] and represents a part of wider research in the field of automated construction progress monitoring (ACPM) [9]. The main contribution of mentioned approach was given to the process of continuous partial point cloud acquisition on-site using multiple 3D scanners integrated in workers' helmets for the purpose of automated construction progress monitoring as shown in Figure 4.3.



**Figure 4.3.** A scenario of indoor and outdoor continuous partial point cloud acquisition on-site using multiple helmet-mounted scanners [8]

## **5. Conclusion**

The paper briefly outlined the efforts at the Chair of Construction Management, Technology and Economics to effectively implement BIM into construction practice. Our students also took part in the development of 4D and 5D BIM models for the facility of kindergarten Pekre as it was presented. At the same facility, we continued research work for the aim of construction monitoring, where the pre-developed 4D and 5D BIM models served as bases for determining the differences between the planned and the realized execution, more commonly known as As-planned vs. As-built comparison. We will continue research work in the direction of automation of processes by developing new methods and including examples of good practice, thus contributing to the effective implementation of BIM into the construction industry.



## References

- [1] Galić, M., Venkrbec, V., Chmelik, F., Feine, I., Pučko, Z., Klanšek, U., "Review of BIM's Implementation in some EU AEC Industries", 13th Int. Conf. Organ. Technol. Manag. Constr., 2017.
- [2] Galić, M., Venkrbec, V., Chmelik, F., Feine, I., Pučko, Z., Klanšek, U., "Survey of Accomplishments in BIM Implementation in Croatia, the Czech Republic, Germany, and Slovenia," *Elektron. časopis građevinskog Fak. Osijek*, vol. 8, no. 15, pp. 23–35, 2017, doi: 10.13167/2017.15.3.
- [3] Pučko, Z., *Katalog zaključnih del študentov UM FGPA z vsebinami s področja informacijskega modeliranja gradbenih objektov (BIM)*, no. april. University of Maribor Press, 2017, doi: 10.18690/978-961-286-031-8.
- [4] Location of kindergarten facility in Pekre, zemljevid.najdi.si, 10.07.2018.
- [5] *Risbe arhitekture – vrtec Pekre* (el. datoteka); vrsta projektne dokumentacije: PGD – načrt arhitekture; projektant: Projekta inženiring Ptuj d.o.o.; številka projekta: 120-44-58-10, marec 2011, Situacija M 1:250.
- [6] Završki, J., 2014. BIM kot orodje za trajnostno gradbeništvo in energetska prenova. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Cerovšek, T., co-supervisor Košir, M.): 43 pp.
- [7] Šuman, N., Pučko, Z., Zaključno poročilo o rezultatih razvojno-raziskovalnega projekta operativno spremljanje gradnje z BIM pristopom : (dogovor o sodelovanju št. 02/2017-NŠ-DDP) : COBISS+. 2017.
- [8] Pučko, Z., Šuman, N., Rebolj, D. "Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans", *Advanced Engineering Informatics*, Volume 38, pp. 27–40, October 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.06.001.
- [9] Rebolj, D., Pučko, Z., Babič, Č. N., Bizjak, M., Mongus, D. "Point cloud quality requirements for Scan-vs-BIM based automated construction progress monitoring," *Automation in Construction*, Volume 84, pp. 323-334, December 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.09.021.



## Model predviđanja otopljenog kisika za različite scenarije - Drava kod Donjeg Miholjca

Anamarija Rabi<sup>1</sup>

(1) Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, Republika Hrvatska, [anamarija.rabi@gfos.hr](mailto:anamarija.rabi@gfos.hr)

### Sažetak

Rijeke su složeno prirodno okruženje gdje fizikalni, biološki i kemijski procesi koji se istovremeno odvijaju određuju kakvoću vode. Izradom različitih numeričkih modela omogućuje se pouzdanije praćenje kakvoće vode. Za izradu modela predviđanja kakvoće vode primjenom unaprijednih neuronskih mreža odabrana je postaja Donji Miholjac na Dravi za razdoblje od 1993. do 2016. godine. Pri odabiru parametara koji će se modelirati i njima pripadajućih ulaznih parametara korištena je korelacijska analiza (Pearsonova korelacija, korelacija udaljenosti). Klaster analizom i podjelom cijelog skupa na male, srednje i velike vode pomoću percentila definirani su ekstremni hidrološki scenariji. Ovaj će rad pokazati mogućnost predviđanja otopljenog kisika pri različitim hidrološkim scenarijima primjenom modela unaprijednih neuronskih mreža. Na slivu se pretpostavlja primjena određenih mjera poboljšanja. Cilj ovog modela je omogućiti bolje praćenje stanja kakvoće vode. Time bi se dala ocjena učinkovitosti pretpostavljenih mjera poboljšanja pri različitim hidrološkim scenarijima.

*Ključne riječi: predviđanje, kakvoća vode, otopljeni kisik, scenariji, neuronske mreže, MatLab*

## The dissolved oxygen prediction model for different scenarios - location of Donji Miholjac at river Drava

### Abstract

Rivers are a complex natural environment with the physical, biological and chemical processes occurring simultaneously, determine the water quality. Various numerical models provide reliable water quality monitoring. Feedforward neural network models were applied for creating water quality prediction models of the river Drava at Donji Miholjac during the 1996. – 2016. period. Correlation analysis (Pearson Correlation, Distance Correlation) was used for selecting the parameters that will be modeled and their corresponding input parameters. Extreme hydrological events are defined by cluster analysis and distribution of the whole dataset into small, medium and large water flows. This paper will show the possibility of predicting dissolved oxygen in different hydrological scenarios using the feedforward neural network model. The implementation of certain improvement measures is assumed on the basin. The model aims to provide a better monitoring of water quality. This would provide an assessment of the effectiveness of the assumed improvement measures at different hydrological scenarios.

*Keywords: prediction, water quality, dissolved oxygen, scenarios, neural networks, MatLab*

## **1. Uvod**

Razvitak industrije i eksponencijalni rast broja stanovništva znatno utječu na porast količine otpadnih tvari koje se izravno ili neizravno ispuštaju u prirodne vodne sustave. Fizikalni, biološki i kemijski procesi koji se istovremeno odvijaju u vodnim tijelima određuju kakvoću vode koja je važna komponenta održivosti vodnih resursa i upravljanja okolišem. Zbog upotrebljivosti vode za različite namjene, teži se da kakvoća vode ostane na prihvatljivoj razini.

Temperatura vode i otopljeni kisik od izuzetne su važnosti za opstanak riba i drugih živih organizama u vodi. Temperatura vode određuje postotak razgradnje organske tvari, sadržaj otopljenog kisika i kemijske reakcije u cjelini. Na stanje kakvoće vode utječe i količina vode koja protječe određenim protjecanim profilom. Pojavom većih protoka u vodotocima dolazi do razrjeđivanja što ima pozitivan učinak na stanje kakvoće vodotoka, međutim problem nastupa pri malim protocima kada je vodotok najosjetljiviji na promjene.

Na vodne resurse djeluju mnogi čimbenici koji dolaze iz poljoprivredne i industrijske djelatnosti, iz urbanih područja, domaćinstava i turističke djelatnosti. Da bi kvaliteta prirodnih vodnih sustava ostala na prihvatljivoj razini, komunalne otpadne vode prije ispuštanja u okoliš moraju udovoljiti određenim uvjetima kakvoće. Potrebno je analizirati učinkovitost pročišćavanja i djelovati na zadovoljavajući i propisan način kako bi se otpadne vode mogle ispustiti u prijamnike. Poznato je da dušik kao biljno hranjivo predstavlja ključni dio visokih prinosa u biljnoj poljoprivrednoj proizvodnji. Najviše se upotrebljava za proizvodnju umjetnih gnojiva za što ga koristi 85% svjetske proizvodnje [1]. Dušik iz mineralnih gnojiva potiče rast algi i vodenih biljaka što može negativno djelovati na kakvoću vode rijeke. Time započinje eutrofikacija pri čemu se povećano troši otopljeni kisik u vodi. Opadanjem koncentracije kisika u vodi dolazi do pomora vodenih organizama koji kisik troše u procesu disanja. Stoga je poboljšanje kakvoće vodnih resursa visoko na popisu prioriteta Europske unije. Propis za ocjenu kakvoće vode koji je usklađen s Okvirnom direktivom o vodama Europske unije (2000/60/EC) donesen je Uredbom o standardu kakvoće voda koja je na snagu stupila 18. lipnja 2013. godine. Nedavno su naširoko priznate zasluge alternativnih pristupa rješavanju problema modeliranja i predviđanja, kao što neuronske mreže (NM). Tijekom posljednja dva desetljeća primjena modela NM u svijetu je vrlo rasprostranjena, u Hrvatskoj se također primjenjuje u raznim područjima pa tako i u hidrologiji.

Cilj ovog rada je pokazati mogućnost predviđanja otopljenog kisika pri različitim hidrološkim scenarijima izradom i primjenom modela predviđanja temeljenog na NM-u. Na slivu se pretpostavlja primjena sljedećih mjera: poboljšanje komunalne odvodnje, smanjenje unosa mineralnih gnojiva na poljoprivredne površine. Cilj modela je omogućiti pouzdanije praćenje učinka provedbe mjera poboljšanja kakvoće vode. To pridonosi ocjeni učinkovitosti ovih mjera u skladu s prihvaćenim europskim direktivama pogotovo u uvjetima recentnih klimatskih promjena.

## 2. Područje istraživanja

Područje istraživanja smješteno je u donjem toku rijeke Drave na mjestu hidrološke postaje Donji Miholjac (Slika 1). Prema Uredbi o standardu kakvoće voda (NN 73/2013), rijeka Drava je klasificirana kao nizinska vrlo velika tekućica koja ulazi u Hrvatsku kod Dubrave Križovljanske, ulijeva se u Dunav kod Aljmaša. Ukupne je dužine 725 km, od čega je 323 km u Hrvatskoj. Riječni režim Drave je pluvijalno-glacijalnog karaktera, s visokom vodostajima u proljetno-ljetnom razdoblju tijekom svibnja i lipnja, a najmanji vodostaji su u zimskom razdoblju u siječnju i veljači [2].



Slika 1. Prikaz rijeke Drave s analiziranom postajom Donji Miholjac

### 2.1. Baza podataka

Hidrološke parametre (protok, temperatura vode) za razdoblje od 1993. do 2016. godine dao je DHMZ (295 mjerenja), dok su parametre kakvoće vode (električna vodljivost, alkalitet, PH, otopljeni kisik, BPK5, KPK-Mn, amonij, nitrati, ukupni dušik i ukupni fosfor) dale Hrvatske vode za isto razdoblje (295 mjerenja). Kod Donjeg Miholjca ispušta se komunalna otpadna voda u odvodni kanal koji se ulijeva u rijeku Dravu uzvodno od mjesta uzorkovanja kakvoće vode. Komunalna otpadna voda pročišćava se na postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda Donji Miholjac (UPOV DM). Podatci o kakvoći otpadne vode (suspendirana tvar, KPK, BPK<sub>5</sub>) na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda Donji Miholjac (UPOV DM) preuzeti su od komunalnog gospodarstva Park d.o.o. za razdoblje od 1996. do 2016. godine (134 mjerenja). Od 2012. godine u pogon je uvedeno i biološko pročišćavanje otpadnih voda (III. stupnja pročišćavanja), a do 2012. godine obavljao se samo I. stupanj pročišćavanja. Onečišćenje dušikom iz mineralnih gnojiva koje dolazi s poljoprivrednih površina (F=559km<sup>2</sup>) unutar malog sliva »Županijski kanal« utječe na kakvoću vode rijeke Drave kod Donjeg Miholjca. Podatak o količini upotrijebljenog dušika iz mineralnih gnojiva je iskazan u tonama na godišnjoj osnovi i podijeljen s brojem mjeseci unutar jedne godine.

### 3. Metode istraživanja

Osnovna statistička i korelacijska analiza upotrijebljena je za utvrđivanje ulaznih parametara potrebnih za izradu modela otopljenog kisika primjenom NM-a. Pri korelacijskoj analizi između hidroloških parametara i otopljenog kisika koristio se Pearsonov koeficijent korelacije koji je uglavnom osjetljiv na linearni odnos između dvije varijable, dok je za utvrđivanje nelinearnosti, korišten koeficijent korelacije udaljenosti (engl. *Distance correlation*) [3]. Na cijelom skupu podataka dodatno je provedena k-struka klaster analiza (engl. *k-mean cluster analysis*) u cilju grupiranja sličnih objekata iz veće cjeline u manje skupine koje sadrže elemente sličnih svojstava. Cijeli skup podataka dodatno se dijelio na male, srednje i velike vode pomoću percentila. Ovim postupcima definirali su se nepovoljni hidrološki scenariji za predviđanje otopljenog kisika.

#### 3.1. Unaprijedne neuronske mreže (UNM)

Pri modeliranju i predviđanju otopljenog kisika korišten je računalni program za numeričko modeliranje MathWorks MATLAB.

Za izradu modela predviđanja kakvoće vode korišten je model Unaprijednih neuronskih mreža (engl. *Feedforward neural networks*). NM predstavljaju pojednostavljeni matematički model procesa koje obavljaju biološke neuronske mreže, a sastoji se od skupa međusobno povezanih umjetnih neurona čiji se konačan oblik formira nakon završenog procesa učenja. Učenjem mreža stječe znanja o rješavanju određenog problema. Mreža se obično sastoji od tri sloja. Prvi ili ulazni sloj jedini je sloj koji prima signale izvana. On prenosi signale sljedećem sloju (skriveni sloj) koji obrađuje ove podatke i šalje svoje izlazne vrijednosti narednom sloju, trećem sloju mreže. Konačni rezultati obrade dobivaju se na izlazima neurona trećeg ili izlaznog sloja. Postupak učenja NM-a može se definirati kao iterativni postupak podešavanja težinskih parametara ( $w$ ), koji se odvija prema određenom algoritmu. Cilj učenja mreže je određivanje vrijednosti parametara mreže za koje će pogreška, odnosno funkcija cilja, biti minimalna.

Umjetni neuron je osnovni dio NM-a. Izlaz statičkom neuronu u nekome trenutku ovisi samo o vrijednostima ulaznih signala i težinskim koeficijentima. Umjetni neuron u  $k$ -tom koraku računa odziv  $o_k$  prema izrazu (1), gdje  $p_k$  označava sumu otežanih  $m$ -ulaza definiranu izrazom (2), a  $\varphi$  označava aktivacijsku funkciju dotičnog neurona. Izrazi (1) i (2) predstavljaju matematički model umjetnog neurona čiji su ulazi označeni sa  $u_k$ , a vrijednosti težinskih koeficijenata su označene sa  $w_k$  [4].

$$o_k = \varphi(p_k) \quad (1)$$

$$p_k = \sum_{n=0}^m (w_k \cdot u_k)_n \quad (2)$$

Iznosi težinskih koeficijenata određuju vladanje mreže, tj. njezinu sposobnost aproksimacije nelinearne funkcije. Izračunavanje odgovarajućih iznosa težinskih koeficijenata ostvaruje se algoritmima učenja. Kod modeliranja primjenom UNM-a na skupu za učenje se obavlja kalibracija podešavanjem težinskih koeficijenata mreže u cilju smanjenja pogreške. Testni

skup je validacijski skup na kojemu se obavlja provjera uspješnosti odnosno kakvoće modela.

Statistički pokazatelji uspješnosti modela korišteni u ovome radu su korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) definiran izrazom (3) i Pearsonov koeficijent korelacije (R) definiran izrazom (4) [5]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (d_s - o_s)^2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{s=1}^N (d_s - \bar{d})(o_s - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{s=1}^N (d_s - \bar{d})^2 (o_s - \bar{o})^2}} \quad (4)$$

gdje je: ( $d_s$ ) - mjerena vrijednost, ( $o_s$ ) - odziv modela, odnosno predviđena vrijednost,  $\bar{d}$  - srednja vrijednost mjerenih podataka,  $\bar{o}$  - srednja vrijednost odziva modela.

Osnovni lokalni algoritmi učenja prvog reda za podešavanje parametara UNM-a su propagacija greške unatrag (engl. *error back propagation*, *BP*) te unaprjeđenja izvornog BP algoritma. Lokalni algoritmi učenja drugog reda su quazi-Newtonov algoritam, metoda konjugiranog gradijenta (engl. *conjugate gradient*), Levenberg-Marquardt (LM) algoritam i Bayesova regularizacija (engl. *Bayesian regularization*) koja je nadogradnja LM algoritma [4].

#### 4. Rezultati modela

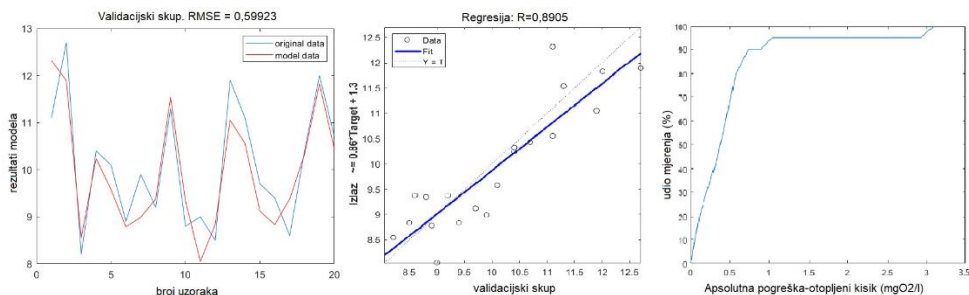
Modeliranju je prethodila statistička i korelacijska analiza na osnovi koje se može zaključiti da je odnos između hidroloških parametara, ostalih parametara kakvoće vode (električna vodljivost, alkalitet, nitrati) i otopljenog kisika linearan. Peterostrukom klaster analizom i podjelom cijelog skupa na male, srednje i velike vode pomoću percentila definirani su nepovoljni hidrološki scenariji za predviđanje otopljenog kisika. Nepovoljni hidrološki scenariji mogu se odviti pri malim protocima ( $Q_{min}$ ) i visokim temperaturama vode ( $T_{max}$ ). Dodatni scenariji koji se promatraju pri predviđanju otopljenog kisika su utjecaj poboljšanja sustava pročišćavanja komunalne otpadne vode (komunalna voda<sub>min</sub>) i smanjenje unosa dušika iz mineralnih gnojiva na poljoprivredne površine ( $N_{min}$ ).

U ovome je radu konstruirana troslojna UNM s algoritmom učenja zvanim Bayesova regularizacija [6] za model predviđanja otopljenog kisika. Pri izradi modela otopljenog kisika uzeta su u obzir dva različita modela UNM za različite kombinacije kako slijedi: UNM1 (razdoblje od 1993. do 2016.) – ulazni parametri su: protok, temperatura vode, električna vodljivost, alkalitet, nitrati; UNM2 (razdoblje od 1996. do 2016.) – ulazni parametri su: protok, temperatura vode, električna vodljivost, alkalitet, nitrati, kakvoća komunalne otpadne vode (suspendirana tvar, KPK, BPK<sub>5</sub>), dušik iz mineralnih gnojiva. Na 85% nasumično odabranih podataka provedena je kalibracija modela, a na preostalih 15% nasumično odabranih podataka provedena je validacija modela ili provjera kakvoće modela. Optimalan broj neurona potreban za treniranje mreže odabran je pomoću peterostruke unakrsne validacije (eng. *5-fold cross-validation*). Ovim postupkom određena je optimalna mrežna topologija s variranjem broja neurona u skrivenom sloju od 1 do 20. Svaki uzorak na skupu

za učenje tijekom eksperimenta unakrsne validacije ponovljen je 5 puta, a odabrana je srednja vrijednost rezultata za taj uzorak. Za neurone u skrivenom sloju korištena je tansig aktivacijska funkcija, purelin je korišten kao aktivacijska funkcija za izlazni neuron. Statistički pokazatelji uspješnosti modela otopljenog kisika na validacijskom i skupu za učenje prikazani su u Tablici 1. Slika 2 prikazuje učinak najboljeg modela UNM2, na validacijskom skupu, za otopljeni kisik na postaji Donji Miholjac. Mjerene vrijednosti otopljenog kisika kreću se u rasponu 7.5 – 13.9 mgO<sub>2</sub>/l. Odabrani model je UNM2 za koji je na skupu za učenje RMSE=0.561 i R=0.928. Na validacijskom skupu je RMSE=0.599 i R=0.891. Za najbolje vrijednosti statističkih pokazatelja model UNM2 odabran je za predviđanje otopljenog kisika.

**Tablica 1.** Statistički pokazatelji uspješnosti modela (UNM1 i UNM2)

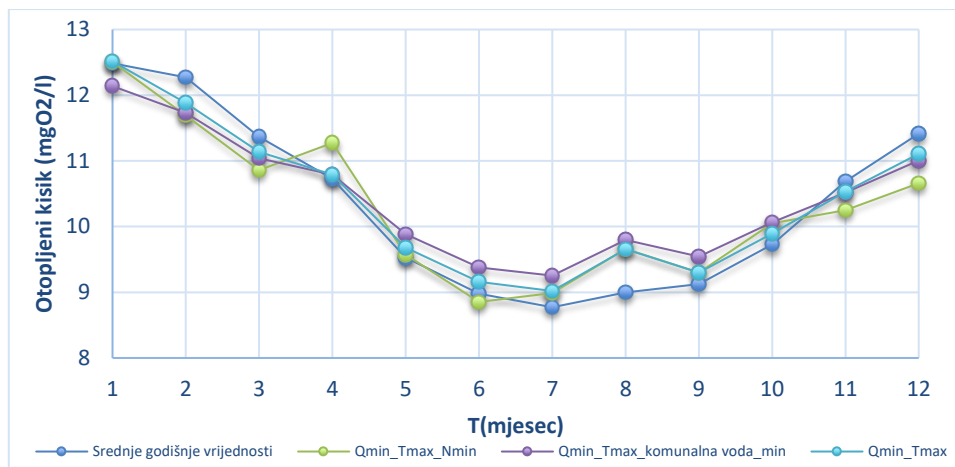
Oznaka Modela (mrežna arhitektura)	Skup za učenje		Validacijski skup	
	RMSE	R	RMSE	R
UNM1 (1 skriveni sloj, br.neurona =5)	0.781	0.868	0.870	0.834
<b>UNM2 (1 skriveni sloj, br.neurona =14)</b>	<b>0.561</b>	<b>0.928</b>	<b>0.599</b>	<b>0.891</b>



**Slika 2.** Prikaz učinka najboljeg modela UNM2 za otopljeni kisik na postaji Donji Miholjac na validacijskom skupu: a) RMSE=0.599; b) R=0.891; c) kumulativni histogram.

Na Slici 2 c) prikazan je kumulativni histogram na validacijskom skupu za otopljeni kisik iz kojega se može zaključiti da će u 95% slučajeva apsolutna pogreška biti manja od 1. Rezultati predviđanja otopljenog kisika pri različitim scenarijima prikazani su na Slici 3.





**Slika 3.** Rezultati modela predviđanja otopljenog kisika tijekom narednih 12 mjeseci

Slika 3 prikazuje predviđanje otopljenog kisika ako se pretpostavi da će u budućnosti mjerenja biti slična kao i do sada. Tada se na osnovi različitih scenarija može predvidjeti otopljeni kisik u narednih 12 mjeseci. Tamnoplava krivulja prikazuje otopljeni kisik sa srednjim vrijednostima ulaznih veličina. Zeleno je prikazan otopljeni kisik s ulaznim vrijednostima minimalnih protoka, maksimalnih temperatura vode i minimalnog unosa dušika, a sve ostale su srednje vrijednosti. Ljubičasto prikazan otopljeni kisik s ulaznim vrijednostima minimalnih protoka, maksimalnih temperatura vode i minimalnog onečišćenja od komunalne otpadne vode, a sve ostale su srednje vrijednosti. Svijetloplavo je prikazan otopljeni kisik s ulaznim veličinama minimalnih protoka, maksimalnih temperatura vode, a sve ostale su srednje vrijednosti. Za svaku krivulju promatraju se uzlazne vrijednosti za model UNM2 za razdoblje od 1996. do 2016. godine.

## 5. Zaključak

Prema statističkim pokazateljima uspješnosti modela, može se zaključiti da model UNM2, iako ima kraći niz mjerenja (1996-2016), daje bolje rezultate od UNM1 za duži niz mjerenja (1993-2016). Međutim model UNM2 ima više ulaznih podataka koji se uzimaju u obzir prilikom izrade modela. Prema tome se može zaključiti da poboljšanje komunalne otpadne vode (suspendirana tvar, KPK, BPK<sub>5</sub>) i smanjenje unosa dušika s poljoprivrednih površina pozitivno utječu na koncentraciju otopljenog kisika u vodi. Prema rezultatima predviđanja otopljenog kisika za narednih 12 mjeseci pri različitim scenarijima može se zaključiti da otopljenog kisika ima najviše u zimskom razdoblju kada je temperatura vode u rijeci najniža, a kada je temperatura vode viša, vrijednost otopljenog kisika u rijeci opada. Rezultati otopljenog kisika (Slika 3) tijekom narednih 12 mjeseci, dobiveni modelom predviđanja pomoću UNM2, upućuju na to da će se vrijednosti otopljenog kisika pri nepovoljnim hidrološkim scenarijima u ljetnim mjesecima, kada je rijeka najosjetljivija na dodatne utjecaje, najviše povećati kada se onečišćenje od komunalne otpadne vode (ljubičasta linija) i unosa nitrata s poljoprivrednih površina (zelena linija) svede na minimum. Najbolje

rezultate otopljenog kisika prikazuje ljubičasta linija za scenarij poboljšanja sustava komunalne odvodnje pri nepovoljnim hidrološkim uvjetima. Dakle povećanje protoka i smanjenje temperature vode u ljetnim mjesecima može samo pogodovati povećanju otopljenog kisika koji je pod utjecajem predviđenih mjera poboljšanja. Prema rezultatima se može zaključiti da se modeli UNM mogu primijeniti pri izradi modela predviđanja otopljenog kisika za različite scenarije.

## **Literatura**

- [1] Jambrošić, S.: Određivanje dušikovih spojeva u otpadnim vodama s pročištača otpadnih voda, Završni rad, 2016.
- [2] Jelić, M., Jelić, D., Žutinić, P., Čaleta M.: Fish fauna of the lower reaches of the river Drava and surrounding marshland habitats near Donji Miholjac (Eastern Croatia). *Croatian Journal of Fisheries*, 70 (4), 153–167, 2012. doi:10.1214/009053607000000505.
- [3] Szekely, G. J., Rizzo, M. L., Bakirov, N. K.: Measuring and Testing Independence by Correlation of Distances, *Annals of Statistics*, 35 (6): 2769–2794, 2007.
- [4] Matić, P.: Kratkoročno predviđanje hidrološkog dotoka pomoću umjetne neuronske mreže, doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje u Splitu, Sveučilište u Splitu, 2016.
- [5] Rabi, A., Hadzima-Nyarko, M., Šperac, M.: Modelling river temperature from air temperature: case of the River Drava (Croatia), *Hydrological sciences journal*. 60, 9; 1490-1507, 2015. doi: 10.1080/02626667.2014.914215.
- [6] MacKlay, D.: Bayesian Methods for Adaptive Models. Doctoral dissertation. California Institute of Technology Pasadena, California, 1992.

## Razvoj teorije blokova u stijenskom inženjerstvu

Nicola Rossi<sup>1</sup>, Marko Mance<sup>1</sup>, Meho-Saša Kovačević<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, {nrossi; msk}@grad.hr

### Sažetak

Klasična teorija blokova, službeno objavljena 1985. godine s objavom knjige „Block Theory and Its Application to Rock Engineering“ [1], sadrži niz pojednostavljujućih pretpostavki. Takve pretpostavke omogućile su stvaranje jednostavne metode koja uz prihvatljiva ograničenja daje zadovoljavajuće rezultate za inženjerske potrebe. Usprkos tome, tijekom godina se nastojalo unaprijediti klasičnu teoriju, kako bi se mogla akomodirati složenijim problemima, i/ili povećala pouzdanost proračuna realnijim opisivanjem stanja u stijenskoj masi. Cilj ovoga članka je napraviti pregled istraživanja provedenih u cilju unaprjeđenja određenih ograničenja klasične teorije blokova. Na temelju pregleda pretpostavki i ograničenja klasične teorije te dosadašnjih istraživanja, mogu se lakše identificirati područja za daljnji razvoj teorije blokova.

*Ključne riječi: teorija blokova, razvoj, daljnja istraživanja, stijensko inženjerstvo*

## The development of block theory in rock engineering

### Abstract

Classic block theory, officially established in 1985 with the publishing of the book “Block Theory and Its Application to Rock Engineering” [1], takes a lot of simplifying and restricting assumptions. Such assumptions allowed for a simple method which with acceptable restrictions gave satisfying results for engineering practice. Despite that, there have been many improvements throughout the years which try to accommodate for more complex problems and/or increase the overall reliability of the method. The scope of this paper is to give an overview of said improvements over the classic block theory. Based on the overview of assumptions of the classic theory and on the researches to date, it's possible to more easily identify areas of further research and improvement.

*Keywords: block theory, improvement, further research, rock engineering*

## 1. Uvod

Klasična teorija blokova nastala je kao relativno jednostavno rješenje za analizu kompleksnog problema ispadanja stijenskih blokova proizvoljnih oblika, pri površinskim ili podzemnim iskopima. Razvijena je kao alternativno rješenje kompleksnim i skupim fizičkim modelima te numeričkim analizama. U odnosu na njih, teorija blokova uvodi pojednostavljujuće pretpostavke koje omogućuju jednostavan opis i rješavanje zadanog problema uz zadovoljavajuću točnost za inženjerske svrhe. Metoda se uglavnom temelji na geometrijskim parametrima diskontinuiteta za formiranje blokova te analizu njihove stabilnosti, uz dodatak mehaničkih karakteristika diskontinuiteta u smislu kuta unutarnjeg trenja. Spomenuti geometrijski parametri odnose se na nagib (eng. *dip*), smjer nagiba (eng. *dip direction*), smjer pružanja diskontinuiteta (eng. *strike*), razmak diskontinuiteta (eng. *spacing*) te duljine njihovih tragova (eng. *trace length*). Presijecanjem diskontinuiteta različitog porijekla, veličina i karakteristika, nastaju različiti tipovi blokova u stijenskoj masi. Blokovi se kategoriziraju u 5 kategorija ovisno o njihovoj geometriji te položaju u stijenskoj masi [1]. Za svaki blok provjeravaju se uvjeti konačnosti i odstranjivosti na temelju kojih se razlikuju potencijalno kritični blokovi od stabilnih blokova. Potencijalno kritičnim blokovima pripadaju oni koji su ujedno konačni i odstranjivi te kojima se daljnjom analizom određuje stabilnost. Nestabilni blokovi na kojima je potrebno primijeniti mjere sanacije su pravi kritični blokovi. Budući da se blokovi stvaraju i unutar stijenske mase, a ne samo na kontaktu s površinom iskopa, ideja na kojoj se zasniva teorija blokova je da se osiguranjem stabilnosti prvog, kritičnog bloka, odnosno sprječavanjem njegovih pomaka, stabiliziraju i svi blokovi u stijenskoj masi iza njega. Odnosno, izmicanje kritičnoga bloka bi prouzrokovalo regresivan slom. Cilj je stoga odrediti sve kritične blokove na površini nekog iskopa te ih po potrebi stabilizirati.

Zbog svoje jednostavnosti i zadovoljavajućih rezultata za inženjerske potrebe, teorija blokova ima široku primjenu u stijenskom inženjerstvu, pri rješavanju problema vezanih za temeljenje na stijeni, procjeni potrebne podgrade u tunelogradnji, procjeni minimalnog razmaka dviju tunelskih cijevi, ocjeni utjecaja dimenzija podzemnog iskopa na cijenu podgrade, određivanje duljina sidara za stabilizaciju blokova, predviđanju najpovoljnijih smjerova iskopa tunela i kosina, predviđanju najpovoljnijeg nagiba kosina, itd. [2]. Jednostavnost teorije blokova proizlazi iz niza pojednostavljujućih pretpostavki navedenih u nastavku. Kako je teorija blokova razvijena krajem prošlog stoljeća, u međuvremenu su do sada razvijena mnoga proširenja kako bi se što vjerodostojnije definirali stijenski blokovi te opisalo njihovo ponašanje u stijenskoj masi. Cilj ovoga rada je upravo navesti ograničenja te prikazati neka značajna unaprjeđenja klasične teorije blokova koja su se postigla od njenog razvoja do danas.

## 2. Pretpostavke i ograničenja

Ograničenja u definiranju i rješavanju problema teorijom blokova se mogu podijeliti na 2 uzroka: ograničenja koji se odnose na prikupljanje podataka (greške u procjeni, mjerenju i nepoznatim uvjetima u stijeni koji nisu vidljivi na površini stijenske mase) te ograničenja

zbog same metode i pretpostavki. U ovom je radu analizirana druga skupina ograničenja. Pretpostavke klasične teorije blokova fokusiraju se na pojednostavljenju stvarnih uvjeta u stijeni u cilju formiranja metode primjenjive u inženjerskoj praksi, koristeći odabrane, relativno lako (i točno) mjerljive parametre. Goodman i Shi [1] definiraju 4 takve pretpostavke:

- I. Diskontinuiteti leže u ravnim plohama (ravninama);
- II. Diskontinuiteti se u potpunosti pružaju kroz promatrani volumen stijenske mase;
- III. Blokovi su apsolutno kruti;
- IV. Parametri diskontinuiteta i ravnina iskopa su deterministički parametri.

Već su na temelju osnovnih pretpostavki vidljiva neka ograničenja teorije blokova. Prva pretpostavka ograničava pružanje diskontinuiteta samo na jednu ravninu, čime se olakšava formulacija metode, ali ujedno zanemaruje mogućnost pojave zakrivljenih pukotina, odnosno stranica bloka (npr. granice slojeva). Zanemarivanje krutosti blokova i okolne stijenske mase analizu olakšava utoliko što isključuje sve posljedice deformiranja stijenske mase uslijed pomaka bloka te potrebu za definiranjem mehaničkog ponašanja stijenske mase. Također uklanja i statičku neodređenost bloka. Time se analiza svodi na relativno jednostavnu analizu krutih blokova na temelju prethodno definiranih geometrijskih (za određivanje bloka) i mehaničkih (za proračun stabilnosti) parametara. Kombinacija teorije blokova s numeričkim metodama bi omogućila uzimanje u obzir deformabilnost stijenske mase i blokova.

Potrebni geometrijski parametri svakoga diskontinuiteta određuju se relativno jednostavnim tehnikama u sklopu geološkog kartiranja, a poteškoće se javljaju tek u daljnjoj analizi prikupljenih podataka. Kao ulazni podatak u analizi teorijom blokova prihvaća se samo jedna vrijednost određenog parametra koji opisuje neki diskontinuitet. Ako postoji varijacija u parametrima kartiranih diskontinuiteta, postavlja se pitanje koje vrijednosti koristiti u analizi da bi se dobio relevantan prikaz stanja na terenu. S obzirom na to te na pretpostavku pružanja diskontinuiteta cijelim volumenom stijene, ovom se metodom dobivaju podaci samo o maksimalnoj veličini bloka, dok su očekivana veličina i učestalost pojavljivanja nepoznate.

Pored navedenih ograničenja koja se mogu izravno iščitati iz osnovnih pretpostavki, postoje razne druge stavke koje ograničuju primjenu metode. Na primjer, analiza stabilnosti blokova definirana je isključivo za slučaj klizanja, bez rotacije. Pretpostavljeno je da se takvo klizanje odvija samo preko jedne ili dvije stranice bloka (ravnine diskontinuiteta) koje su u kontaktu s okolnom stijenom. Budući da nema kontakta između stijenske mase i ostalih stranica, to znači da se sva otpornost ostvaruje samo na stranicama koje sudjeluju u klizanju (jedna ili dvije), čime se može znatno podcijeniti stvarna otpornost. Nadalje mehanički parametar za određivanje otpornosti u analizama stabilnosti je isključivo kut unutarnjeg trenja, stoga bi implementacija drugih kriterija određivanja posmične čvrstoće pridonijela točnijoj procjeni stabilnosti. Ocjenu postojećih kriterija za određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta dali su Singh i Basu [3]. U nastavku je dan pregled metoda različitih autora u cilju rješavanja navedenih ograničenja te unaprjeđenja teorije blokova.

### 3. Razvoj metode

#### 3.1. Statističke metode u teoriji blokova

Statističke metode kod teorije blokova mogu se odnositi na razne faze analize, od analize podataka o diskontinuitetima do analiza stabilnosti. Kako je spomenuto u prethodnom poglavlju, u klasičnoj teoriji blokova se koriste jedinstvene vrijednosti nagiba, smjerova nagiba, razmaka i duljina tragova diskontinuiteta. S obzirom na to da u stvarnosti postoji varijacija tih parametara među različitim diskontinuitetima, formiraju se setovi diskontinuiteta prema sličnim geometrijskim karakteristikama. U cilju raspoznavanja diskontinuiteta koji pripadaju istom skupu, primjenjuju se metode grupiranja (eng. *clustering*), koje su predložili različiti autori u periodu od kasnih 70-ih do danas [4]. Nadalje se statističkom analizom varijacije parametara unutar jednog seta pomoću njihovih distribucija vjerojatnosti, dobivaju srednje vrijednosti koje nabolje opisuju pojedini set. Iako se tako odabire najbolja jedinstvena vrijednost svakog parametra pojedinog seta, i dalje u proračune ulazi isključivo jedna usrednjena vrijednost. Prilikom grupacije je potrebno imati na umu podjelu diskontinuiteta na mikropukotine, pukotine, plohe folijacija, slojne plohe, smične plohe te rasjede, jer su, ovisno o postanku, neki od njih podložni za statističke analize, dok se drugi analiziraju zasebno [4].

Probabilističke metode za analizu blokova počele su se razvijati ubrzo nakon objave klasične teorije, kojima su se nastojale uzeti u obzir varijacije i nesigurnosti parametara diskontinuiteta zbog vrlo jasnog nedostatka u korištenju deterministički određenih vrijednosti. Metoda koju su predložili Tyler i dr. [5] sastoji se od definiranja distribucija vjerojatnosti svakog geometrijskog parametra diskontinuiteta te formiranja proizvoljno velikog uzorka metodom uzorkovanja „Latin Hypercube“, koji služi za daljnju analizu. Pomoću računalnog programa razvijenog za tu svrhu formiraju se blokovi od diskontinuiteta konačnih dimenzija, čija se geometrija zatim uspoređuje s geometrijom samih diskontinuiteta u cilju otkrivanja može li se takav blok formirati ili ne. Za blok s mogućnošću formiranja se geometrijski provjerava mogućnost njegovog ispadanja (geometrijska stabilnost). Postupak se ponavlja s ostatkom vrijednosti iz slučajnog uzorka. U konačnici se statistički obrađuju rezultati da bi se dobili podaci o očekivanim dimenzijama bloka te vjerojatnosti pojavljivanja određenog bloka [5]. Opisani postupak zanemaruje korelaciju među različitim parametrima koja bi, u slučaju da postoji, mogla znatno utjecati na rezultate. U navedenoj metodi analizira se geometrija bloka te se razlikuju stabilni od potencijalno nestabilnih blokova, bez proračuna razine stabilnosti svakoga od njih. U cilju određivanja vjerojatnosti sloma, Zhao i dr. [6] su predložili probabilističku analizu stabilnosti blokova koja, pored uobičajenih vjerojatnosti formiranja geometrijski potencijalno nestabilnog bloka i vjerojatnosti sloma uslijed mehaničkih karakteristika, uzima u obzir i vjerojatnost nastupanja jednog od 3 tipa sloma kako je definirano klasičnom teorijom blokova. Napredak za ovu metodu bila bi implementacija ostalih tipova sloma, opisanih kao proširenje klasičnoj teoriji blokova u poglavlju 3.2.

### 3.2. Rotacija bloka

U klasičnoj teoriji blokova definirana su samo tri načina pomicanja bloka: ispadanje ili izdizanje, klizanje po jednoj ravnini, klizanje po dvije ravnine. Zasebne formulacije rotacije te klizanja i rotacije prizmatičnih blokova i klinova su postojale i prije razvoja teorije blokova, ali su tek kasnije implementirane u nju. Mauldon [7] je dodatno proširio teoriju blokova rješenjima rotacije tetraedralnih blokova s tri seta pukotina [2]. Rotacija bloka generalno uključuje nekoliko različitih tipova rotacije, a može nastupiti kao čista rotacija ili kao rotacija s klizanjem. Prvi tip je rotacija oko presječne ravnine stranice bloka i površine kosine (eng. *toppling*). Na sličan se način blok može rotirati oko samo jednog kuta koji je u kontaktu s površinom kosine oko bilo koje osi koja kroz njega prolazi. Isto kao i kod čiste rotacije, dva su sloma koji se odnose na kombinaciju rotacije i klizanja. Prvi je rotacija s torzijskim klizanjem gdje blok rotira oko osi okomite na ravninu površine kosine koja prolazi kroz neki vrh bloka. Drugi se odnosi na rotaciju koja se događa uslijed klizanja prilikom ispadanja iz stijenske mase [2]. Rješenja su implementirana u metode teorije blokova, odnosno vektorsku metodu i stereografsku projekciju. Za neke od specifičnih slučajeva klizanja ostaje problem definiranja posmične čvrstoće, u analitičkim ili numeričkim metodama proračuna.

### 3.3. Stabilnost kritičnog bloka

Kako je već spomenuto, analiza stabilnosti klasičnom teorijom blokova dopušta klizanje po jednoj ili maksimalno dvije ravnine, a razlog tome je pretpostavka da blok gubi kontakt sa stijenom na ostalim plohama. Ustvari, u stanju granične ravnoteže, prije nego što dođe do pomaka bloka, blok i dalje ima kontakt sa stijenom preko svih stranica. Stoga u slučajevima pojave klinova ili tetraedralnih blokova na kosinama, rješenja prema klasičnoj teoriji daju zadovoljavajuće rezultate, međutim u slučaju blokova oblika poliedra s više od dvije stranice, u kontaktu sa stijenom će klasična teorija blokova podcijeniti njihovu stabilnost. Jiang i Zhou [8] su iznijeli formulaciju metode proračuna stabilnosti kompleksnijih blokova uzimajući u obzir raspodjelu normalnih i posmičnih sila po svakoj stranici bloka koja je u kontaktu sa stijenom. Metoda podrazumijeva diskretizaciju bloka na proizvoljan broj stupaca na kojima se provode kontrole statičke ravnoteže jednadžbama ravnoteže sila i momenata. Zbog potrebe za diskretizacijom bloka na velik broj stupaca radi povećanja točnosti metode, takva je metoda primjerena za računalne analize. Pored toga što metoda omogućuje proračun stabilnosti kompleksnijih blokova, daje i informaciju o smjeru klizanja bloka, što je u klasičnoj teoriji blokova bilo potrebno zasebno provjeriti [8]. Metoda je razvijena i verificirana na blokovima površinskih iskopa, stoga bi daljnji razvoj bio primjena na podzemne iskope.

### 3.4. Alati za provođenje analiza teorijom blokova

Analizu teorijom blokova moguće je provesti jednom od dvije postojeće metode: vektorska (analitička) metoda i stereografska projekcija (grafička metoda). Prednost grafičke metode je jednostavno i intuitivno provođenje analize te mogućnost vizualiziranja cijelog postupka i rezultata proračuna. Stereografska projekcija je metoda koja trodimenzionalni problem svodi na dvodimenzionalni, tako da se svi blokovi projiciraju na jednu ravninu, a zatim se za potrebe određenih analiza formiraju trodimenzionalni modeli blokova. U cilju stvaranja

intuitivnijeg prikaza analize teorijom blokova, Li i dr. [9] su razvili metodu za interaktivnu analizu teorijom blokova na 3D sferi. Metoda se bavi analizom blokova izravno u 3D prostoru, čime se izbjegava pretvaranje prvo u dvije pa nazad u tri dimenzije. Boljom vizualizacijom problema se postiže i bolje razumijevanje teorije blokova.

#### 4. Zaključak

Primjena klasične teorije blokova ograničena je nizom pojednostavljujućih pretpostavki na kojima se temelji, a na čiji je račun od svoje objave do danas doživjela mnoga unaprjeđenja. S obzirom na to da se svako unaprjeđenje osvrće na specifičan problem unutar teorije blokova, za potrebe ovoga rada je kompletna analiza teorijom blokova podijeljena na 3 faze, za koje su u Tablici 1 rezimirani svi navedeni napreci te dani prijedlozi za daljnja istraživanja u svakom od tih područja. Mogućnost zadavanja zakrivljenih ploha diskontinuiteta te implementacija numeričkih metoda za uvažavanje deformabilnosti stijenske mase prilikom definiranja blokova, su područja koja nisu doživjela velik napredak, a čiji bi napredak utjecao na realnije otkrivanje potencijalno kritičnih blokova. Svaki napredak metode mora težiti održavanju jednostavnosti originalnog postupka uz dodatak točnijeg, preciznijeg i pouzdanijeg rješenja predmetnog problema te po mogućnosti implementiranju prethodnih napredaka.

**Tablica 1.** Objavljeni napreci i prijedlozi za daljnja istraživanja

Napreci		Prijedlozi za daljnja istraživanja	
1) Prikupljanje i analiza geometrijskih i mehaničkih podataka o diskontinuitetima			
• Metode grupacije		• Statistička svojstva parametara diskontinuiteta	
2) Formiranje i analiza blokova			
• Statističke metode za formiranje blokova od različitih kombinacija diskontinuiteta, određivanje očekivanih dimenzija bloka te učestalosti njihovog pojavljivanja		• Mogućnost zadavanja zakrivljenih diskontinuiteta	
• Softveri za 3D analizu blokova			
3) Analiza geometrijske i mehaničke stabilnosti			
• Definirano više potencijalnih mehanizama sloma		• Definiranje posmične čvrstoće u specifičnim slučajevima sloma	
• Numeričke analize		• Unaprjeđenje metoda proračuna	
		• Uvažavanje karakteristika deformabilnosti stijenske mase	
		• Implementacija kompleksnijih modela posmične čvrstoće	

#### Literatura

- [1] Goodman, R. E., Shi, G.: Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 1985.
- [2] Goodman, R. E.: Block theory and its application, Géotechnique, 45(3), pp. 383-423, 1995, doi: 10.1680/geot.1995.45.3.383.
- [3] Singh, H. K., Basu, A.: Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities, Engineering Geology, 232, pp. 171-181, 2017, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.023.
- [4] Navratil, D.: Statistički model osnovnih geometrijskih značajki diskontinuiteta u mezozojskim karbonatnim stijenama, doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2011.



- [5] Tyler, D. B., Trueman, R., Pine, R. J.: A probabilistic method for predicting the formation of key blocks, *Mining Science and Technology*, 13, pp. 145-156, 1991, doi: 10.1016/0167-9031(91)91310-e.
- [6] Zhao H., Li, Z., Kong, C. S.: Probabilistic Method to Determine the Overall Rock Block Failure Based on Failure Mode, *Engineering Transactions*, 64(1), pp. 105-113, 2016.
- [7] Mauldon, M: Rotational failure modes in jointed rock: a generalization of block theory, PhD thesis, University of California, 1992 (prema Goodman [2]).
- [8] Jiang, Q., Zhou, C.: A rigorous solution for the stability of polyhedral rock blocks, *Computers and Geotechnics*, 90, pp. 190-201, 2017, doi: 10.1016/j.compgeo.2017.06.012.
- [9] Li, J., Xue, J., Xiao, J., Wang, Y.: Three Dimensional Sphere Analysis Method of Block Theory, 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010), Taiyuan, pp. V1-578-V1-582., doi: 10.1109/ICCASM.2010.5620625.



## Utjecaj recikliranog agregata od gume na materijalnu nelinearnost betona

Kristina Strukar<sup>1</sup>, Tanja Kalman Šipoš<sup>1</sup>

(1) Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, Republika Hrvatska, {kstrukar; tkalman}@gfos.hr

### Sažetak

Zbog sve većeg zagađenja okoliša uzrokovanog između ostalog i automobilskim gumama, rješenje se pokušava pronaći njihovim recikliranjem i upotrebom u građevinarstvu. U ovom će radu biti prikazan kratak pregled prethodnih istraživanja pomoću kojih su dobivene detaljne informacije o prednostima i nedostacima dodavanja gume kao agregata na svojstva betonske mješavine. Neke od prednosti uključuju i poboljšanje duktilnosti zbog čega postoji mogućnost korištenja ovakvog betona u konstrukcijama na mjestima gdje postoji povećani rizik od seizmičkog opterećenja. Zbog nedovoljno informacija o ponašanju betona s gumom pod tlačnim opterećenjem, odnosno odnosa naprezanje-deformacija, provedena su preliminarna ispitivanja valjkastih uzoraka, a dobiveni rezultati i zaključci će se prikazati u radu.

*Ključne riječi: zagađenje, reciklaža, guma, beton, naprezanje-deformacija*

## The impact of recycled rubber aggregates on material nonlinearity of concrete

### Abstract

Due to the increasing environmental problems caused, among other pollutants, by tire-rubber, a solution could be found by its recycling and use in constructions. A brief review of previous investigations on advantages and disadvantages of concrete's properties are presented in this paper. Some of the advantages include improvement in ductility of concrete and thus the usage possibility of rubberized concrete in constructions that are built in areas of increased seismic hazards. Due to the lack of information about the stress-strain behavior of rubberized concrete, preliminary experiments were carried out on cylindrical specimens. Obtained results and conclusions are also presented in this paper.

*Keywords: pollution, recycling, tire-rubber, rubberized concrete, stress-strain*

## 1. Uvod

Zahtjevi za primjenom recikliranih materijala u proizvodnji betona, kao jednog od najčešće korištenih materijala u građevinarstvu, postaju sve češći. Suprotno, sve veći problem predstavlja odlaganje automobilskih guma. Prema izvješću ETRMA-e [1] čak 3.5 milijuna tona ovog otpada nastaje u zemljama članicama Europske unije. Trenutno je samo 5% recikliranih otpadnih guma iskorišteno u građevinarstvu iako je njihov potencijal za ponovnu upotrebu i stvaranje novih materijala i proizvoda puno veći [2].

Jedno od rješenja bila je upotreba reciklirane gume u proizvodnji betona kao djelomična zamjena agregatu u vidu gumenog praha ( $> 1$  mm), gumenog granulata (1-10 mm) ili gumenih niti (20-30 mm). Pregledom literature ovog područja istraživanja uočene su prednosti u pogledu poboljšanja mehaničkih i dinamičkih svojstava kao što su poboljšanje tvrdoće, duktilnosti, dinamičkih svojstava uključujući i koeficijent prigušenje te otpornosti na stvaranje pukotina u betonu [3-7]. S druge strane nedostaci su se očitovali u smanjenju tlačne čvrstoće i modula elastičnosti [8-11]. Prema prethodno navedenom, može se zaključiti da se ovakav beton s gumom može koristiti za proizvodnju lakoagregatnog betona koji bi bio pogodan za ugradnju u konstrukcije na područjima povećane opasnosti od potresa, a za koje je vrlo važno svojstvo duktilnosti, odnosno sposobnosti konstrukcije da podnese deformacije i u postelastičnom području bez značajne redukcije u čvrstoći [12-15].

## 2. Pregled područja

Podatak o ponašanju i duktilnosti betona dobiva se iz  $\sigma - \varepsilon$  krivulja koje predstavljaju odnos naprezanja i deformacije i važne su za nelinearnu analizu betonskih elemenata. Pregledom literature uočen je velik broj ispitivanja mehaničkih svojstava, ali i nedostatak informacija o ispitivanju ponašanja betona s gumom pod tlačnim opterećenjem, odnosno  $\sigma - \varepsilon$  krivulja. Bompa i ostali [3] ispitivali su valjkaste uzorke betona ( $\varnothing 100$  mm  $\times$  200 mm) sa 20% - 60% gume pomoću kontrole pomaka 0.1 mm/min. Slično ispitivanje proveli su Li i ostali [5] na uzorcima betona sa 6% - 18% gume. Kontrola pomaka iznosila je 0.001 mm/s, a deformacije uzoraka zabilježene su pomoću dodatnih deformetara koji su mjerili pomake gornje ploče. Khaloo i ostali [4] ispitivali su kako zamjena određenog volumena pijeska i šljunka s gumenim prahom i gumenim granulatom utječe na ponašanje betona. Opterećenje je nanošeno brzinom 0.005 mm/s. Iz dobivenih krivulja zaključeno je da vršno naprezanje ovisi o udjelu pijeska u mješavini, dok je oblik krivulje određen udjelom šljunka. Lijuan i ostali [16] ispitivali su utjecaj veličine i količine čestica gume na ponašanje betona. Opterećenje je nanošeno brzinom 0.003 mm/s. Iz dobivenih rezultata zaključili su da je maksimalna deformacija betona s gumom veća što je veći udio gume i što su čestice gume manje. Xie i ostali [17] zamijenili su 4% - 16% volumena pijeska gumenim granulatom i dodali čelična vlakna u betonsku mješavinu. Pored toga potpuno su zamijenili šljunak recikliranim krupnim agregatom. Uzorke su ispitivali brzinom 0.003 mm/s, a rezultati su pokazali veće deformacije pri vršnom naprezanju i ravniji padajući dio krivulje.

U ovom će se radu prikazati postupak i rezultati ispitivanja betona sa 10%, 20%, 30% i 40% volumena gume u betonskoj mješavini, trend opadanja čvrstoće s povećanjem udjela gume,

$\sigma - \varepsilon$  krivulje za svaku od mješavina te će se na temelju ispitanih uzoraka vizualno procijeniti utjecaj količine gume na veličinu i broj pukotina.

### 3. Eksperimentalno ispitivanje

#### 3.1. Sastav betonske mješavine

Osnovni materijal korišten pri izradi betonskih mješavina bio je Portland cement čvrstoće 32.5 MPa. Od prirodnih agregata (PA) korišten je pijesak veličine zrna 0-2 mm i 2-4 mm, šljunak veličine zrna 4-8 mm i 8-16 mm. Gumeni granulat (GG) dobiven mehaničkim usitnjavanjem otpadnih guma granulacije 0.5-2 mm korišten je kao reciklirani agregat. Kako bi se postigla optimalna konzistencija mješavine, korišten je dodatak Glenium ACE 430 (GL ACE 430). U Tablici 1 prikazani su podatci o udjelu pojedinog materijala u betonskoj mješavini.

Oznake betonskih mješavina dane su sa RNC-X ili NC-X pri čemu se RNC i NC odnose na referentni normalni beton i normalni beton, a X označava udio gumenog granulata u mješavini kojim je 10%, 20%, 30% i 40% volumena pijeska frakcije 0-2 mm i 2-4 mm zamijenjeno gumenim granulatom.

**Tablica 1.** Sastav betonske mješavine

Oznaka mješavine	w/c	Cement 32.5 N	Voda	GL ACE 430	GG 0.5-2 mm	PA 0-2 mm	PA 2-4 mm	PA 4-8 mm	PA 8-16 mm
		[kg/m <sup>3</sup> ]							
RNC-0	0.45	500	198.1	2.6	0	281	484.6	252	551.4
NC-10	0.45	500	225	2.6	58.4	208.6	403.8	252	551.4
NC-20	0.45	500	225	2.6	116.8	134	323	252	551.4
NC-30	0.45	500	225	2.6	175.2	59.6	242.4	252	551.4
NC-40	0.45	500	225	2.6	233.8	0	145.4	252	551.4

#### 3.2. Rezultati ispitivanja svježeg betona

Rezultati ispitivanja svojstava normalnog betona u svježem stanju dani su u Tablici 2. Može se uočiti da se povećanjem postotka GG masa betonske mješavine u odnosu na referentnu smanjuje do 17% pri čemu se poroznost povećava za čak 264%.

**Tablica 2.** Rezultati ispitivanja svojstava normalnog betona u svježem stanju

Oznaka mješavine	Masa betonske mješavine [kg]	Smanjenje u odnosu na referentnu	Poroznost [%]	Povećanje u odnosu na referentnu
RNC-0	18.845	-	1.4	-
NC-10	18.059	-4.17%	1.8	+28.57%
NC-20	17.288	-8.26%	2.5	+78.57%
NC-30	16.474	-12.58%	3.0	+114.28%
NC-40	15.643	-16.99%	5.1	+264.28%

### 3.3. Priprema uzoraka i postavke ispitivanja

U svrhu ispitivanja tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i odnosa naprezanje-deformacija, ukupno je pripremljeno 15 betonskih kocki, po tri za svaku mješavinu iz Tablice 1, dimenzija 150 mm × 150 mm × 150 mm i 30 valjaka, po šest za svaku mješavinu, promjera 150 mm i visine 300 mm. Ispitivanje tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i odnosa naprezanje-deformacija provedeno je nakon 28 dana na tlačnoj preši. Tlačna čvrstoća ispitivana je na betonskim kockama prema normi HRN EN 12390-3:2001, a modul elastičnosti na betonskim valjcima prema normi HRN EN 12390-13:2013.

Krivulja koja prikazuje odnos naprezanje-deformacija ( $\sigma - \varepsilon$  krivulja), dobivena je ispitivanjem betonskih valjaka na koje se opterećenje nanosilo kontroliranim naprezanjem 0,01 MPa/s. Podatci o deformacijama uzorka dobiveni su pomoću dva dodatna deformetra koji su postavljeni s dvije strane uzorka kako je prikazano na Slici 1a) i koji mjere pomake gornje ploče preko koje se nanosi opterećenje, a koji su jednaki deformacijama uzorka od trenutka kad je dotaknuta gornja ploha uzorka.

## 4. Rezultati ispitivanja očvrstlog betona i analiza

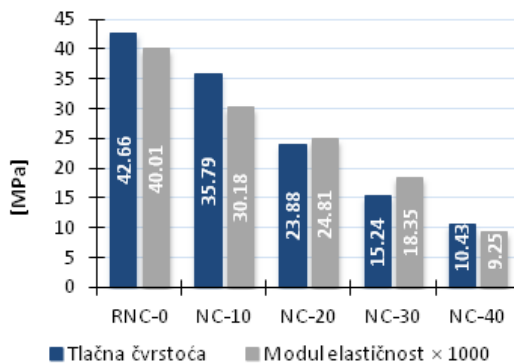
### 4.1. Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti

Rezultati dobiveni ispitivanjem tlačne čvrstoće i modula elastičnosti prikazani su na Slici 1 b) na kojoj je vidljivo da se tlačna čvrstoća pri lomu reducira s povećanjem udjela GG u mješavini. Tlačna čvrstoća betonskih mješavina sa 10%, 20%, 30% i 40% udjela GG umanjena je za 22%, 52%, 62% i 87% u odnosu na referentnu mješavinu RNC-0.

Rezultati ispitivanja modula elastičnosti pokazali su da isto tako dolazi do njegove redukcije pa je tako za 10%, 20%, 30% i 40% modul elastičnosti umanjen za 4%, 27%, 67% i 90% u usporedbi s modulom elastičnosti referentne mješavine RNC-0. Iz ovih rezultata može se zaključiti da povećanjem količine gumenih čestica u betonskog mješavini, dolazi do veće redukcije ovih svojstava.



a)



b)

**Slika 1.** a) Postavke ispitivanja odnosa naprezanja i deformacije; b) Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti na betonskim kockama.

## 4.2. Odnos naprezanja i deformacije

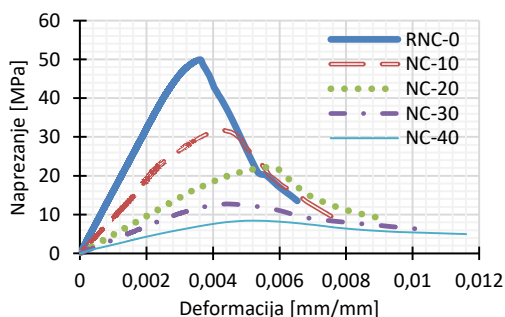
Odnos tlačnog naprezanja  $\sigma$  i deformacije  $\varepsilon$  ispitanih uzoraka prikazan je krivuljama na Slici 3a od kojih svaka predstavlja ponašanje reprezentativnog uzorka od tri ispitana za svaku mješavinu. Krivulje  $\sigma - \varepsilon$  mogu se podijeliti na dio prije maksimalnog naprezanja i na dio nakon doseganja maksimalnog naprezanja. Prvi dio krivulje je uglavnom linearan, dok se u blizini vršnog naprezanja zakrivljuje. Razlika između referentne mješavine i drugih mješavina sa GG je u nagibu pravca linearnog dijela krivulje koji je manji za betonsku mješavinu sa GG.

Na drugom dijelu krivulje razlike između ovih mješavine još su očitije jer je vidljivo da mješavine sa GG podnose veće deformacije nakon dostizanja vršnog naprezanja u odnosu na referentnu što znači da im je unatoč smanjenju čvrstoće, povećana duktilnost. Može se primijetiti postupno opadanje vršnog naprezanja i rast deformacija sa svakim povećanjem udjela GG-a.

Načini sloma ispitanih uzoraka na Slici 2b utvrđeni su vizualnim ocjenjivanjem nakon provedenog ispitivanja. Vidljivo je da je referentni uzorak pod brojem 1 imao najkrtiji lom, obilježen dugim i širokim manjim brojem pukotina popraćenih odlamanjem manjih dijelova uzorka. Već sa 10% dodanih gumenih čestica primjetna je razlika u širini, duljini i broju pukotina. Sa sve većim udjelom gume u betonskoj mješavini, slom uzoraka je duktilniji, predvidljiviji, pukotine su brojnije, ali manje i uže te nema odlomljenih dijelova.

**Tablica 3.** Rezultati ispitivanja naprezanja i deformacije na betonskim valjcima

n	Oznaka mješavine	Maksimalno naprezanje	Deformacija pri maksimalnom naprezanju	Najveća deformacija
		[MPa]	[mm/mm]	[mm/mm]
1	RNC-0	49.90	0.0036	0.0065
2	NC-10	31.78	0.0043	0.0080
3	NC-20	22.29	0.0057	0.0090
4	NC-30	12.74	0.0044	0.0103
5	NC-40	8.43	0.0052	0.0116



a)



b)

**Slika 2.**  $\sigma - \varepsilon$  krivulje za normalan beton bez gume (RNC-0-500) i normalan beton sa 10%, 20%, 30% i 40% GG; b) Ispitani betonski valjci

## 5. Zaključak

Glavni cilj ispitivanja prikazanog u ovom radu bio je vidjeti utjecaj količine gumenog granulata kojim je zamijenjen određen postotak pijeska u betonskoj mješavini na tlačnu čvrstoću, modul elastičnosti i na odnos naprezanja i deformacije. Ispitivanjem uzoraka pripremljenih od betona sa 0% - 40% gumenog granulata pod tlačnim opterećenjem, rezultati su pokazali da se povećanjem postotka gumenog praha, smanjuje njegova masa, tlačna čvrstoća i modul elastičnosti, a povećava poroznost. Dobivene  $\sigma - \varepsilon$  krivulje uputile su na nelinearno ponašanje u usporedbi s referentnim normalnim betonom, na bolju deformacijsku sposobnost i time na veću duktilnost i bolju apsorpciju energije, a isti zaključak dobiven je iz vidljivog načina sloma uzoraka s većim brojem manjih pukotina i bez odlomljenih dijelova uzoraka.

Betonske mješavine prikazane u ovom radu nisu sadržavale dodatke kojima bi se utjecalo na mehanička svojstva. Stoga će se u daljnjim istraživanjima dodacima poput silicijske prašine i letećeg pepela te optimalne granulacije gumenog agregata, nastojati postići betonske mješavine koje će za iste postotke gumenog agregata u ovom istraživanju postizati veće tlačne čvrstoće i module elastičnosti kako bi bila moguća njihova primjena u konstrukcijama, osobito u onima na područjima povećane opasnosti od potresa.

## Literatura

- [1] ETRMA, "End-of-life Tyre Report 2015," p. 36, 2015.
- [2] Council of the European Union, "Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the land fill of waste," 1999.
- [3] Bompa, D. V., Elghazouli, A. Y., Xu, B., Stafford, P. J., Ruiz-Teran, A. M.: Experimental assessment and constitutive modelling of rubberised concrete materials, *Constr. Build. Mater.*, vol. 137, pp. 246–260, 2017; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.086.
- [4] Khaloo, R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P.: Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles, *Waste Manag.*, vol. 28, no. 12, pp. 2472–2482, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.015.
- [5] Li, D., Zhuge, Y., Gravina, R., Mills, J. E.: Compressive stress strain behavior of crumb rubber concrete (CRC) and application in reinforced CRC slab, *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 745–759, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.142.
- [6] Zheng, L., Sharon Huo, X., Yuan, Y.: Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 939–947, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.005.
- [7] Hernández-Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M., Witoszek, B.: Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 10, pp. 1587–1596, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00833-5.
- [8] Gupta, T., Chaudhary, S., Sharma, R. K.: Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate, *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 562–574, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102.
- [9] Ganesan, N., Raj, B., Shashikala, A. P., Nair, N. S.: Effect of steel fibres on the strength and behaviour of Self Compacting Rubberised Concrete, *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 94–107, 2012.



- [10] Ismail, M. K., De Grazia, M. T., Hassan, A. A. A.: Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete with Different Supplementary Cementing Materials, *Int. Conf. Transp. Civ. Eng.*, pp. 68–74, 2015, doi: 10.17758/UR.U0315331.
- [11] AbdelAleem, B. H. Hassan, A. A. A.: Development of self-consolidating rubberized concrete incorporating silica fume, *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 389–397, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.146.
- [12] Ismail, M. K., Hassan, A. A. A.: Performance of full-scale self-consolidating rubberized concrete beams in flexure, *ACI Mater. J.*, vol. 113, no. 2, pp. 207–218, 2016, doi: 10.14359/51688640.
- [13] Ismail, M. K., Hassan, A. A. A., Abdelaleem, B. H.: Flexural behaviour of reinforced SCC beams containing recycled crumb rubber, in *RESILIENT INFRASTRUCTURE*, 2016, p. 11.
- [14] Son, K. S., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K.: Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns, *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 218–226, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.035.
- [15] Moustafa, A., Gheni, A., ElGawady, M. A.: Shaking-Table Testing of High Energy–Dissipating Rubberized Concrete Columns, *J. Bridg. Eng.*, vol. 22, no. 8, p. 4017042, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001077.
- [16] Li, L., Ruan, S., Zeng L.: Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles, *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 291–308, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.105.
- [17] Xie, J. H., Guo, Y. C., Liu, L. S., Xie, Z. H.: Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber, *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 263–272, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.036.



## Aparatura za mjerenje električnog otpora u temperaturnom rasponu od 300 K do 670 K

Josipa Šćurla<sup>1</sup>, Petra Pranić<sup>1</sup>, Ana Puljas<sup>2</sup>, Ante Bilušić<sup>1</sup>

(1) Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu, Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Republika Hrvatska, [jscurla@pmfst.hr](mailto:jscurla@pmfst.hr)

(2) Sveučilište u Splitu, Poljička cesta 35, 21000 Split, Republika Hrvatska

### Sažetak

U ovom radu prikazujemo aparaturu za mjerenje električnog otpora uzoraka duljine do 5 mm. Okruženje se sastoji od eksperimentalne aparature i programske podrške za kontroliranje eksperimenta, a dostupni raspon temperatura je od sobne temperature do 670 K. Eksperimentalna aparatura sastoji se od peći, ručno izrađenog nosača koji može istovremeno nositi dva uzorka te potrebnih mjernih uređaja. Mjerenje se izvodi u argonovoj atmosferi. Na temperaturnom području 320 K – 670 K potpuno je automatizirano, uz mogućnost mijenjanja svih parametara tijekom izvođenja mjerenja.

*Ključne riječi: električni otpor, visokotemperaturno mjerenje*

## An environment for high-temperature measurement of electrical resistance from 300 K to 670 K

### Abstract

In this work we present a complete environment for high-temperature measurement of electrical resistance for samples of maximum length of 5 mm. The environment consists of experimental apparatus and appropriate program support. Available temperature range is from room temperature to 670 K. Apparatus consists of an oven, handmade sample stick that can place two samples at the same time and needed measurement devices. Measurements are conducted in an argon atmosphere. On temperature range 320 K - 670 K measurement is completely automatised, with the possibility of changing all measurement parameters dynamically.

*Keywords: electrical resistance, high-temperature properties*

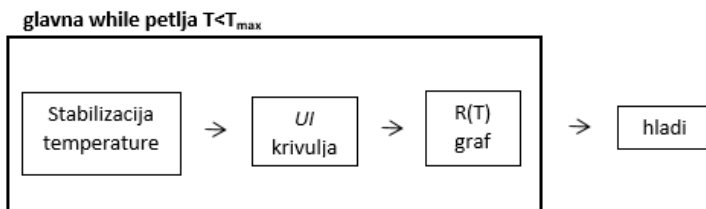
## 1. Uvod

Svojstva modernih tehnoloških uređaja (dugovječnost, cijena, dimenzije, mogućnosti) određena su materijalima od kojih su uređaji napravljeni. Stoga je moderna industrija u neprestanoj potrazi za materijalima veće kemijske i mehaničke stabilnosti, poželjnih transportnih svojstava, a koji su istovremeno, kako bi se smanjio trošak proizvodnje, široko dostupni ili barem jeftino proizvedivi. Najvažniju ulogu u prvoj fazi potrage za materijalima sa superlativnim karakteristikama imaju upravo znanstvenici u znanstvenim laboratorijima. Na temelju njihovih inicijalnih ispitivanja pojedinog materijala određuje se isplativost daljnjeg ulaganja u njegov razvoj te općenito buduća tržišna kretanja.

Na osnovi svega navedenog, smatramo bitnim osposobljavanje laboratorija za visokotemperaturno ispitivanje materijala na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Splitu. Osnivanjem laboratorija želimo pridonijeti jačanju suradnje sveučilišnih sastavnica te posljedično još boljem pozicioniranju Sveučilišta u Splitu na državnoj, ali i svjetskoj znanstvenoj i gospodarskoj karti.

## 2. Koncept mjerenja električnog otpora

Uspostavljeno okruženje za ispitivanje visokotemperaturnog električnog otpora sastoji se od eksperimentalne aparature i programske podrške za kontroliranje eksperimenta [1]. Osnovni princip je mjerenje električnog otpora uzorka preko njegove karakteristične strujno-naponske ( $UI$ ) krivulje na različitim temperaturama (Slika 1).



**Slika 1.** Koncept mjerenja električnog otpora uzorka na temperaturama višima od sobne,  $T_{\max}$  je konačna temperatura mjerenja

Mjerenje se provodi u proizvoljnom rasponu temperatura od početne ( $T_{\min}$ ) do konačne ( $T_{\max}$ ) uz proizvoljni temperaturni korak. Na svakoj se temperaturi prvo provodi stabilizacija temperature u okruženju uzorka, pri čemu su parametri koji su odgovorni za preciznost stabilizacije, kao i svi ostali parametri mjerenja, dinamički promjenjivi. Nakon stabilizacije temperature odvija se mjerenje  $UI$  krivulje uzorka za odabrane vrijednosti struje te se iz  $UI$  krivulje, prema Ohmovom zakonu, metodom najmanjih kvadrata računa vrijednost otpora uzorka na trenutnoj temperaturi. Nakon završenog mjerenja povisuje se temperatura te se pokreće njena stabilizacija i ponavlja proces mjerenja. Nakon što se obavi mjerenje na posljednjoj temperaturi,  $T_{\max}$ , slijedi automatizirano hlađenje aparature. Svi dijelovi procesa mjerenja (stabilizacija temperature u vremenu -  $T(t)$  ovisnost,  $UI$  krivulja i  $R(T)$  ovisnost) zapisani su u pripadne zasebne datoteke radi kasnije analize rezultata mjerenja. Tijek

izvedbe mjerenja prati se u realnom vremenu preko odgovarajućih grafova - grafa za temperaturnu stabilizaciju, grafa za  $UI$  krivulju te glavnog grafa koji prikazuje ovisnost otpora o temperaturi.

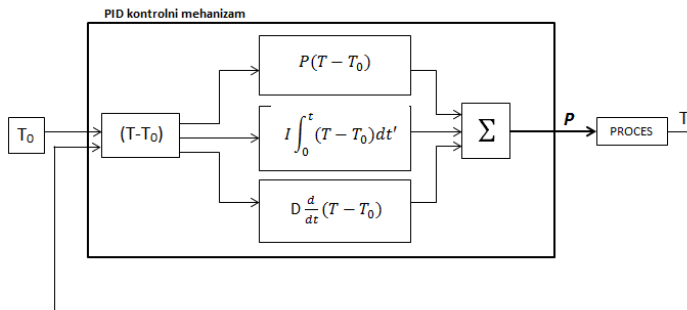
Program za kontrolu eksperimenta pisan je u programskom okruženju LabView 2016. Podijeljen je u smislene podcjeline, a svaka podcjelina je zaseban modul, tako da se moduli programa mogu koristiti u drugim programima ili zasebno (npr. kada želimo samo postići određenu temperaturu u peći pokrećemo modul temperaturne stabilizacije).

## 2.1. Prvi modul: Temperaturna stabilizacija

Kontrola temperature u peći vrši se pomoću PID mehanizma [2], koji je zbog svoje jednostavnosti široko primjenjiv za kontroliranje različitih varijabli nekog sustava, poput tlaka, brzine ili u našem slučaju temperature. Temperatura se kontrolira preko snage grijača peći  $P$ :

$$P = P(T_0 - T) + I \int_0^t (T_0 - T) dt' + D \frac{d}{dt} (T_0 - T). \quad (1)$$

Glavna varijabla pri kontroli je odstupanje trenutne temperature  $T$  od željene  $T_0$ ,  $\Delta T = (T_0 - T)$ . Provjera odstupanja vrši se u mnogobrojnim iteracijama i u svakoj iteraciji se preko izraza (1) vrši podešavanje snage grijača peći. Izraz (1) ima tri člana: proporcionalni, integralni i član derivacije, odakle dolazi akronim PID. Proporcionalni član pridonosi snazi, direktno proporcionalan trenutnom odstupanju, te stoga služi za grubo podešavanje snage grijača. Fina popravljajna vrše se preko  $I$  i  $D$  članova: integralni član akumulira grešku od početka kontroliranja procesa, što nakon mnogih iteracija uzrokuje smanjenje ukupnog odstupanja temperature od  $T_0$ . Član  $D$  značajno pridonosi kada derivacija stabilizacijske krivulje  $T(t)$  ima značajnu vrijednost, odnosno on vodi računa o neželjenim naglim promjenama procesa stabilizacije i korigira ih.



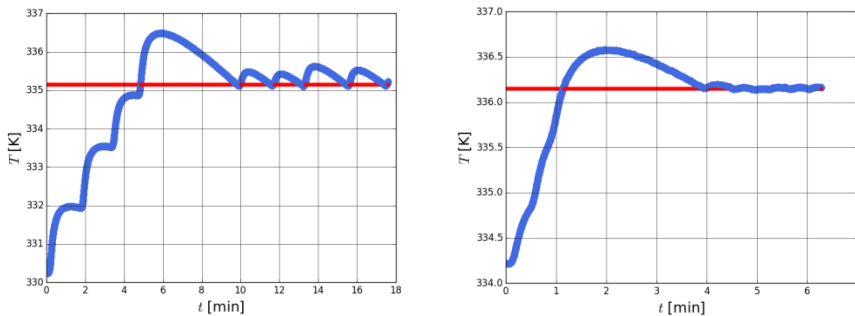
**Slika 2.** PID mehanizam za kontrolu temperature u peći.  $T$  je trenutna,  $T_0$  željena temperatura, a  $P$ ,  $I$  i  $D$  su parametri u PID mehanizmu stabilizacije temperature.

Pri implementaciji PID mehanizma treba odrediti vrijednosti  $P$ ,  $I$  i  $D$  parametara. Za njihovo određivanje postoje razna korisna empirijska pravila i preporuke, no parametri najvećim dijelom ovise o sustavu kojim se želi upravljati. Konkretno,  $P$ ,  $I$  i  $D$  parametre treba prilagoditi s obzirom na materijale i dimenzije peći, odnosno na njihova fizikalna svojstva (toplinski kapacitet). Budući da je peć vrlo složen sustav, optimalni  $P$ ,  $I$  i  $D$  parametri

pronađeni su kombinacijom preporuka i metode pokušaja i pogrešaka [2]. Relacija (2) prikazuje pronađenu empirijsku ovisnost optimalnih PID parametara o temperaturi za korištenu peć:

$$P = 1 \quad I = -0.1 \cdot T_0 + 64.8 \quad D = I/4.16. \quad (2)$$

Kvalitetu temperaturne stabilizacije određujemo pomoću karakteristika krivulje stabilizacije: perioda stabilizacije, maksimalnog prekoračenja (ili nedostizanja) željene temperature te perioda i amplitude preostalih oscilacija temperature nakon stabilizacije. Na Slici 3 lijevo prikazan je primjer loše krivulje stabilizacije koja je dobivena tijekom pronalaženja PID parametara, dok je desno prikazana stabilizacija ostvarena relacijom (2).



**Slika 3.** Primjer loše (lijevo) i dobre stabilizacije (desno) temperature u peći. Kod loše stabilizacije ciljana vrijednost temperature (335.15 K, crvena linija) postignuta je neodgovarajućim PID parametrima 1, 2.5, 1.25. Ciljana vrijednost (336.15 K) dobre stabilizacije postignuta je optimalnim PID parametrima prema pronađenoj empirijskoj relaciji (2).

Lijevi graf pokazuje preošivanje ciljne temperature za više od 1 K i ostvarivanje stabilizacije nakon deset minuta, uz preostale oscilacije s amplitudom od pola stupnja. S ovakvom stabilizacijom za obavljanje mjerenja od 300 K do 670 K u koracima po 2 K samo za stabilizaciju svih temperatura, trebalo bi 30.8 sati, odnosno više od jednog punog dana [1]. Ovakav ritam mjerenja nije dovoljno brz. Relacijom (2) na istom temperaturnom području postignuta je stabilizacija u četiri minute (Slika 3 desno), uz preošivanje temperature od samo pola stupnja te vrlo male amplitude oscilacija.

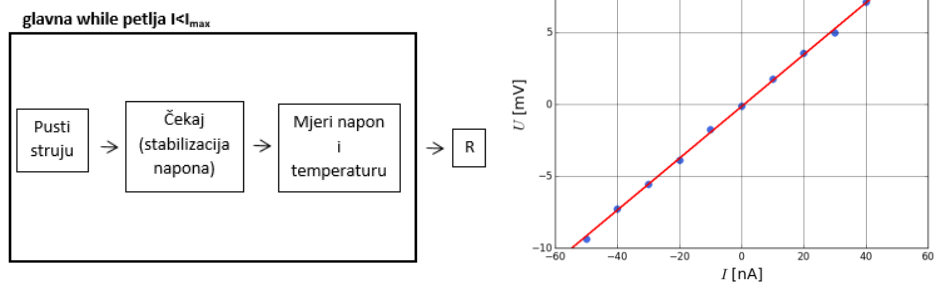
**Tablica 4.** Srednja vrijednost i standardna devijacija karakteristika stabilizacije temperature prema relaciji (2): vrijeme stabilizacije  $T_{stab}$ , maksimalno preošivanje temperature  $A_{max}$ , amplituda i period oscilacija nakon stabilizacije  $A_{osc}$  i  $T_{osc}$ . Korak temperature je 5 K, a brzina promjene temperature 2K/min.

T[K]	$T_{stab}$ [min]	$A_{max}$ [K]	$A_{osc}$ [K]	$T_{osc}$ [s]
321.15-431.15	4.59±0.84	0.31±0.16	0.07±0.04	29.35±9.2
436.15-671.15	3.41±0.3	0.44±0.16	0.17±0.05	25.88±2.6

Iz Tablice 1 vidimo da je prosječno vrijeme stabilizacije uvijek ispod 5 minuta (do  $\approx 430$  K je  $(4.6 \pm 0.8)$  min, odnosno iznad  $\approx 430$  K  $(3.4 \pm 0.3)$  min). Skraćenje  $T_{\text{stab}}$  je očekivano. Prosječno maksimalno prekoračenje  $T_0$  je ispod pola stupnja ( $(0.3 \pm 0.2)$  K za niže,  $(0.4 \pm 0.2)$  K za više temperature) što je zadovoljavajuće. Prosječna amplituda i period oscilacija dovoljno su mali kako bi se mogla proglasiti jako dobra prosječna stabilizacija temperature, a porast amplitude i skraćenje perioda na višim u odnosu na niže temperature u skladu je s očekivanim porastom fluktuacija. Temperaturno područje ispod  $\approx 320$  K nije moguće dobro stabilizirati relacijom (2) te je potrebna ručna kontrola stabilizacije.

## 2.2. Drugi modul: Mjerenje otpora preko UI krivulje

Prema Ohmovom zakonu  $U = R \cdot I$ , otpor možemo shvatiti kao nagib izmjenjenog  $UI$  pravca koji dobivamo puštanjem istosmjerne struje uzorkom i mjerenjem napona. Prije mjerenja napona može se uvesti stanica (obično nekoliko sekundi) kako bi se osigurao stabilan mjereni napon.



**Slika 4.** Lijevo: dijagram toka za mjerenje otpora uzorka preko njegove  $UI$  krivulje. Desno: primjer tipične  $UI$  krivulje za kompozitni materijal SU8+grafen na temperaturi 467 K. Izračunati otpor je  $0.18 \text{ k}\Omega$ .

Postupak se ponavlja za zadane vrijednosti struja, a obično se uzima simetrični raspon struja u oba smjera, uobičajeno 10-20 vrijednosti (Slika 4 desno). Iz  $UI$  krivulje metodom najmanjih kvadrata računa se otpor uzorka na toj temperaturi, podaci se zapisuju te se prelazi na sljedeću temperaturu. Pri svakom mjerenju napona mjeri se i zapisuje i temperatura te se iz niza temperatura računa srednja vrijednost temperature koja se pridružuje izračunatom otporu.

## 3. Eksperimentalna aparatura

Aparatura (Slika 7) se sastoji od peći, nosača uzorka, staklene cijevi i sustava cijevi za osiguranje inertne argonove atmosfere u okolini uzorka, mjernih uređaja (multimetri, voltmetri, strujni izvor) te stolnog računala opremljenog GPIB karticom (nije prikazano na Slici 7).

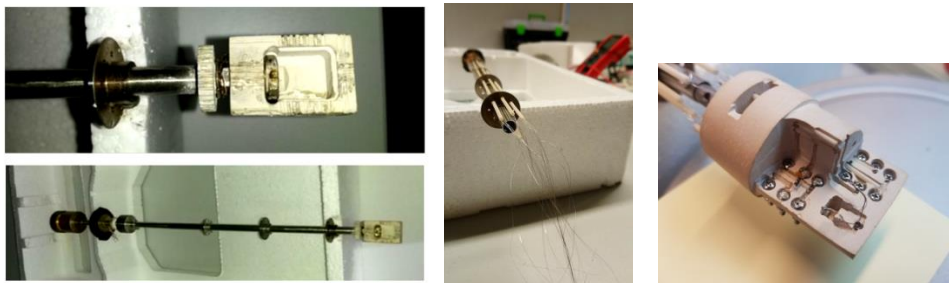
### 3.1. Peć

Marka peći je Carbolite Gero, tip MTF 12/38/250, s ugrađenim programatorom Eurotherm (model 3216). Maksimalna temperatura peći je oko 1450 K. Cilindar peći je vanjskog promjera 20 cm i unutarnjeg promjera 4 cm. Osim direktno preko programatora, peći se može upravljati i njenim spajanjem na računalo putem serijskog sučelja, što je i napravljeno zbog praktičnosti i lakše kontrole mjerenja. Osposobljavanje peći sastojalo se od reinstalacije *firmwarea* te ponovnog baždarenja temperaturne skale, kao i već navedenog pisanja programa za kontrolu temperature.

### 3.2. Nosač uzorka

Ranije korišteni nosač uzorka sastojao se od glavne cijevi duljine oko 40 cm i promjera 1,5 cm, donjeg kraja nosača i glave nosača. Oko glavne cijevi bile su postavljene keramičke cjevčice, pričvršćene metalnim prstenima, kroz koje su provedene zlatne žice od donjeg kraja nosača do glave nosača. U donjem kraju nosača zlatne žice su se spajale sa snopom bakrenih žica preko kojih se dalje nosač spajao s razvodnom kutijom i mjernim instrumentima. Na glavi nosača provedene zlatne žice bile su pripravljene za spoj s uzorkom.

Taj je nosač uzorka velikim dijelom bio oštećen te je napravljena potpuna reparacija nosača. Za te svrhe nosač je ogoljen, kako je prikazano na Slici 5 lijevo.

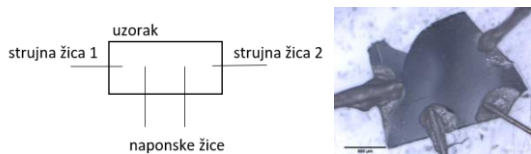


**Slika 5.** Lijevo: ranije korišteni nosač uzorka (dolje) i uvećana glava ranije korištenog nosača uzorka (gore). Sredina: nove keramičke cjevčice kroz koje su provedene platinske žice. Desno: nova glava uzorka s jednim postavljenim uzorkom.

Na glavnu cijev postavljene su četiri nove keramičke cjevčice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , [3]) i kroz njih šesnaest platinskih žica promjera  $100 \mu\text{m}$  (Slika 5. sredina). Kraj žica pri dnu nosača uzoraka zalemljen je s bakrenim žicama te izoliran GE Varnish izolacijskim lakom. Napravljena je nova glava na kojoj su predviđena dva postolja za uzorke i postolje za termometar između uzoraka (Slika 5 desno). Svako postolje ima na raspolaganju šest kontaktnih točki koje su ostvarene na sljedeći način: dovedene platinske žice omotane su svaka oko svog vijka te su zajedno pričvršćeni u predviđene šupljine na glavi u dva reda po tri vijka, tvoreći tako postolje uzorka. Nova glava ima oblik valjka promjera 3.5 cm i načinjena je od *lave* koja je nakon formiranja zapečena na temperaturi 1300 K u trajanju od 45 min [4]. Na glavi su prethodno načinjene dodatne rupe kako bi se spriječilo pucanje tijekom pečenja. Unutar



glave cementom su pričvršćene prethodno oblikovane male keramičke cjevčice kako bi se osigurala međusobna izolacija platinskih žica u glavi. Termometar na glavi je platinski, marke Lake Shore, tip Pt-100, model PT-111-3S [5]. Sastoji se od platinske žice u staklenoj ampuli na kojoj se nalazi zaštitni sloj i smije se zagrijati najviše do 673 K (stoga navedeno temperaturno područje). Termometar je sa četiri žice preko nosača spojen na multimetar kojim mu se mjeri otpor te se potom preko baždarne krivulje može dobiti temperatura na glavi nosača. Da bi se uzorak postavio na glavu, potrebno ga je pripremiti prema shemi na Slici 6.

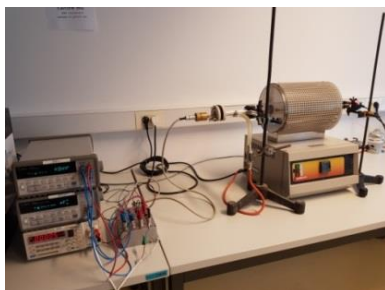


**Slika 6.** Lijevo: shema pripremljenog uzorka. Desno: pripremljeni uzorak SU8+grafen

Na uzorak prema shemi na Slici 6 lijevo trebaju se pričvrstiti dvije strujne i dvije naponske žice. Kod testnih mjerenja korištene su zlatne žice promjera 50  $\mu\text{m}$ , pričvršćene srebrnom pastom (DuPont 4929, [6]). Pripremljeni uzorak treba ostaviti 24 h na sobnoj temperaturi da se kontakti osuše, prema uputama [6]. Zlatne žice potom se oblikuju tako da budu nosači uzorka te se postavljaju na glave vijaka na glavi nosača i ponovno spajaju srebrnom pastom uz isti tretman učvršćivanja.

### 3.3. Postavljanje aparature

Nosač s pripremljenim uzorkom stavlja se u staklenu cijev, a sve zajedno u cilindar peći. Cijev služi za osiguravanje inertne argonove atmosfere u okolini uzorka. Cijev se dobro zatvara s jedne strane pomoćnim hvataljkama (lijevi kraj nosača – Slika 7), dok se s druge strane na otvor cijevi stavlja elastični balon koji služi kao pomični klip zbog ekspanzije argona pri zagrijavanju. Nosač se spaja s razvodnom kutijom koja se potom spaja s multimetrom koji mjeri otpor termometra na glavi nosača, strujnim izvorom kojim se pušta struja kroz uzorak te voltmetrom kojim se mjeri napon na uzorku. Mjerni instrumenti su dalje spojeni sa stolnim računalom kojim se upravlja mjerenjem.



**Slika 7.** Aparatura za visokotemperaturna mjerenja na Odjelu za fiziku PMF-a u Splitu

## **4. Zaključak**

Uspostavljeno je cjelovito automatizirano okruženje za visokotemperaturno ispitivanje električnog otpora na temperaturama od 300 K do 670 K. Dijelovi procesa mjerenja poput kontroliranja peći mogu se koristiti samostalno te je time osiguran temelj za buduće izvođenje ovakvih i složenijih vrsta mjerenja, a odabirom prikladnih mjernih uređaja, može se i proširiti dostupno temperaturno područje.

## **Literatura**

- [1] Šćurla, J.: Visokotemperaturna svojstva električnog otpora kompozita SU8 + grafen, diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Splitu, 2018.
- [2] Šćurla J.: Upravljanje eksperimentalnim uređajem – peći u programskom okruženju LabView, istraživački rad
- [3] Friatec tubes and insulation rods for thermal processes, <https://www.friatec.de/content/friatec/en/Ceramics/FRIALIT-DEGUSSIT-Oxide-Ceramics/High-Temperature-Technology/tubesandinsulationrods/index.html>, 29.06.2018.
- [4] Lava Firing Guide, <https://www.ceramics.net/products-services/materials/grade-a-lava/lava-firing-guide>, 29.08.2018.
- [5] Lake Shore Platinum RTDs, <https://www.lakeshore.com/products/Cryogenic-Temperature-Sensors/Platinum-RTDs/Models/Pages/Specifications.aspx>, 26.08.2018.
- [6] DuPont Conductive Silver Compositions for General Purpose Air-Dry Applications, <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/AirDryAgSelectorGuide.pdf>, 26.08.2018.

## Distribuirana arhitektura za skalabilno motrenje i nadzor

Ljiljana Šerić<sup>1</sup>, Frano Rezo<sup>1</sup>, Dubravko Balić<sup>2</sup>

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Republika Hrvatska, {ljiljana.seric,frano.rezo00}@fesb.hr

(2) Hipersfera d.o.o., Republika Hrvatska

### Sažetak

U različitim sustavima, bez obzira na njihovu svrhu, često je potrebno realizirati kontinuirani nadzor i motrenje prostorno distribuiranog područja obuhvaćenog sustavom senzora. Porastom broja i vrste senzora, rastu i zahtjevi na temeljnu infrastrukturu koje nije lako proširivati za vrijeme rada sustava. U ovom je radu predložena arhitektura za prostorni nadzor i motrenje temeljena na virtualnim poslužiteljima koja pojednostavljuje skalabilnost. Dodatno je postignuta dostupnost resursa i tolerancija grešaka. Arhitektura je primijenjena na inteligentnom sustavu za videonadzor i motrenje šumskih požara te je dana usporedba monolitne i distribuirane arhitekture.

*Ključne riječi: arhitektura, nadzor, motrenje, Internet stvari*

## Distributed architecture for scalable observation and surveillance

### Abstract

In different systems, no matter what their purpose is, it's often needed to manage continuous surveillance and observation over space distributed area covered by the sensor system. With increased number and class of sensors, requirements for basic infrastructure are also increased, which are not easy to expand during operation. In this paper, an architecture based on virtual servers for space surveillance and observation is proposed, which simplifies scalability. Additionally, the availability of resources and error tolerance is accomplished. Architecture is applied to the intelligent system of forest fire video surveillance and observation with the comparison of monolithic and distributed architecture.

*Keywords: architecture, surveillance, observation, Internet of Things*

## **1. Uvod**

Prve aplikacije razvijane su za pogonjenje na mainframe računalima kojima se pristupalo s udaljenih slabih terminala. Nakon toga su rađene desktop aplikacije za osobna računala, no danas, uz mogućnost pristupa internetu u skoro svakom trenutku, najveći trend su aplikacije s web sučeljem.

Aplikacije s web sučeljem imaju specifičnu prednost da su standardnim web sučeljem s različitim uređaja dostupne širokom krugu korisnika, dok se obrada i pohrana podataka koji se prikazuju korisnicima često odvija na udaljenim serverskim računalima koja za to imaju potrebne resurse.

Razvojem senzorskih mreža [1] omogućeno je motrenje teško dostupnih lokacija senzora malih dimenzija s bežičnom komunikacijom i baterijskim napajanjem. Ovakvi uređaju imaju energetska autonomiju, a bežičnim putem svoje podatke dostavljaju korisnicima. Uvođenjem obrade podataka direktno u mreži senzora, integracija izvršnih elemenata s okolišem još je izraženija [1][2][3].

Trend povezivanja računala na globalnu mrežu proširio se i na razne uređaje [1][2]. Povezivanjem različitih uređaja na internet došlo je do pojave interneta stvari (eng. Internet of Things) čime se internet više ne smatra samo mrežom povezanih računala, nego raznih uređaja koji su sposobni komunicirati jedni s drugima i s krajnjim korisnicima - ljudima.

Među uređajima interneta stvari posebno mjesto zauzimaju razni senzori koji ugrađeni direktno u nadzirani prostor, mjere parametre za koje su namijenjeni te izmjerene podatke o trenutnom stanju mogu odašiljati.

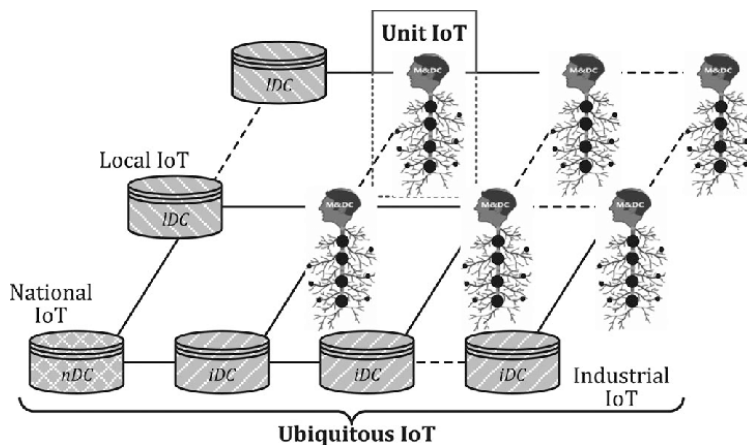
Sustavi za nadzor i motrenje su sustavi kod kojih se senzora mjere i prate parametri sustava, ti parametri se analiziraju i arhiviraju te se u slučaju alarmnih vrijednosti očitavanja sa senzora, poduzimaju odgovarajuće aktivnosti. Korištenjem više senzora različitih vrsta, povećava se količina informacija dostupna za analizu, te se one mogu kvalitetnije i odraditi. Složenije analize zahtijevaju obradu računalom boljih performansi te se ne mogu odraditi na senzoru ili ugrađenim uređajima što znači da je podatke sa senzora potrebno dostaviti na računalo za obradu.

Sustavima za nadzor i motrenjem pojava interneta stvari omogućeno je oslanjanje na infrastrukturu interneta kako bi se povezali prostorno dislocirani dijelovi sustava, a cjelokupni sustavi reorganizirali u nove vrste arhitektura čime se razdvajaju funkcionalni dijelovi sustava.

Tu se često spominje pojam U2IoT [5] (eng. Unit and Ubiquitous Internet of Things) koji predstavlja tipični primjer arhitekture interneta stvari koji obuhvaća široki spektar interakcija između sveprisutnih stvari. Slika 1 prikazuje arhitekturu U2IoT-a koja se sastoji od jediničnih i sveprisutnih interneta stvari.

Jedinični internet stvari (eng. Unit IoT) je temeljni internet stvari u cilju pružanja rješenja za specifične primjene, odnosno aplikacije. Njegova arhitektura se najčešće može usporediti s čovjekovim živčanim sustavom (eng. man-like nervous system - MLN system), tako da mozak predstavlja upravljački i podatkovni centar (eng. management and data center - M&DC), leđna moždina distribuirane kontrolne čvorove, a mreža živaca predstavlja senzore

i aktuatora, odnosno mrežu interneta stvari. Jedinični IoT funkcioniše tako da mreža preko senzora i aktuatora prenosi podatke do odgovarajućih kontrolnih čvorova, te upravljačkog i podatkovnog centra koji prima, obrađuje i šalje poruke natrag prema aktuatorima za upravljanje stvarima.



Slika 1. Arhitektura U2IoT-a [6]

Sveprisutni internet stvari (eng. *Ubiquitous IoT*) predstavlja skup više jediničnih interneta stvari koji mogu kreirati 4 skupine s različitim ciljevima i uslugama:

- Lokalni IoT - sastoji je od više jediničnih IoT-a unutar određene regije;
- Industrijski IoT - sastoji se od više jediničnih IoT-a koji pripadaju određenoj industriji;
- Nacionalni IoT - upravlja svim jediničnim IoT-ima unutar određene nacije, te kontrolira lokalne i industrijske IoT-e koji spadaju u tu naciju;
- Globalni ili internacionalni IoT - odnosi se na specifičnu primjenu na globalnoj razini.

Slojevite arhitekture tipične su za ovakve sustave gdje se na vertikalnim slojevima podaci prikupljaju, zatim obrađuju te konačno prezentiraju korisniku. U ovom radu predstavljamo arhitekturu koja proširuje predloženi model horizontalno distribuiranim virtualnim računalima za obradu kojoj je cilj izolirati pojedinačne procese obrade i potpomoći skalabilnost ukupnog sustava. Rezultati distribuiranih obrada prezentiraju se korisniku na integriranom sučelju.

## 2. Funkcionalnosti sustava za nadzor i motrenje

Sustav za nadzor i motrenje sastoji se od osjetilnih uređaja - senzora postavljenih u nadzirani okoliš kojim se mjere parametri okoliša, te komunikacijske i računalne opreme kojim se postiže željene funkcionalnosti. Iako funkcionalnosti ovakvog sustava ovise o vrsti nadziranog okoliša, neke elemente možemo izdvojiti kao generalne funkcionalnosti.

Većim brojem senzora postiže se bolja preciznost i korisnost cjelokupnog sustava, ali istovremeno prikupljanje i obrada podataka postaje složenija jer se podaci sa svih senzora moraju računalno istovremeno obraditi. Kod takvih sustava je potrebno omogućiti:

- kontinuiranu dostupnost podataka senzora u realnom vremenu,
- alarmiranje u slučaju nedopuštenih vrijednosti,
- čuvanje, pregled i pretragu pohranjenih arhivskih podataka,
- podešavanje parametara sustava,
- razine korisnika i pristup temeljen na ulozi.

Ovakvi sustavi imaju i nefunkcionalne zahtjeve kao što je paralelna obrada podataka, minimalni hardver, sigurna mreža (eng. *firewall*), pristup s bilo koje lokacije, stabilnost sustava (bez utjecaja pojedinačnih kvarova na cjelokupan sustav), kompletan softver bez potrebe za dodatnim instalacijama i sl.. Specifičnost opisanog sustava je u tome što predstavlja vrlo dobar primjer povezanosti jediničnog i sveprisutnog IoT-a. Naime, prikupljanjem podataka pomoću kamera i njihovom obradom se može opisati jedan jedinični IoT, a njihovim grupiranjem na odabranom području za nadzor postiže se lokalni IoT. Kako je sustav trenutno tehnološki jednak u svim odabranim područjima i aktivan na razini područja RH, može se svrstati pod industrijski i nacionalni IoT, s mogućnošću proširenja na internacionalni u budućnosti.

### 3. Distribuirana arhitektura temeljena na virtualnoj okolini

Predložimo arhitekturu koja se oslanja na pretpostavku da se prostorni senzori mogu klasterirati u motrilačke lokacije i na taj način promatrati izolirano. Osnova arhitekture je razdvajanje cjelokupnog računalnog sustava za motrenje i nadzor na motrilačke lokacije čija se programska podrška pogoni na jednom virtualnom računalu koji ima svoju pohranu, svoje podatke i svoje procese.

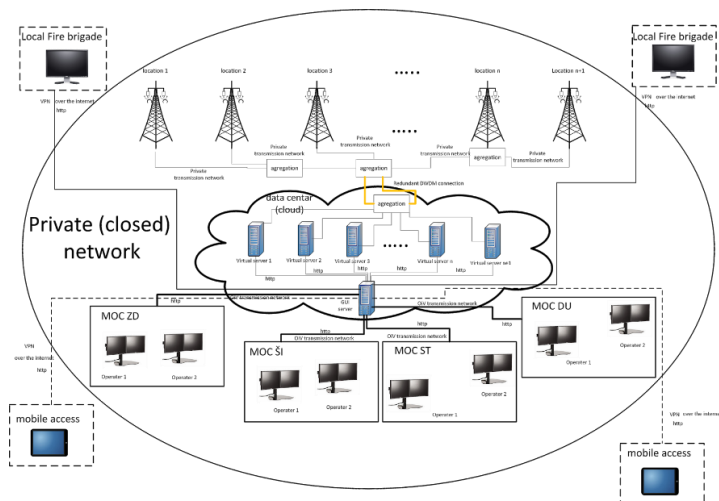
Tehnologija virtualizacije koja podržava ovakvu arhitekturu [7] jest virtualizacija na razini operacijskog sustava koja omogućava optimizirano korištenje jezgre operacijskog sustava (kernela) domaćina pomoću virtualnih računala motrilačkih lokacija, dok je istovremeno potpomognuta sigurnost podataka i procesa obrade. Korisnički pristup sustavu ostvaruje putem dodatnog virtualnog servera putem kojeg se provodi autorizacija i autentifikacija korisnika te dohvat i prikaz korisničkog sučelja za pristup podacima, arhivi i upravljanje sustavom. Korisnicima se omogućava pristup i/ili administracija samo onim elementima sustava za koje imaju ovlaštenja.

Virtualni serveri motrilačke lokacije sa sensorima na terenu komuniciraju putem HTTP zahtjeva i odgovora. Koristi se PULL pristup, tj. server zahtijeva od senzora u periodičnim trenucima i šalje naredbe nakon obrade. Cjelokupna komunikacija sustava ostvarena je putem HTTP protokola čime je olakšano mrežno administriranje jer se proširenje novim motrilačkim lokacijama ostvaruje jednostavnim kloniranjem virtualnog servera.

### 4. Case study - Sustav za videonadzor i motrenje šumskih požara

Početak razvoja sustava IPNAS (Inteligentni protupožarni nadzorni sustav) započet je 2003. godine. Radi se o web informacijskom sustavu koji se temelji na osjetilima poput videokamera i meteoroloških osjetila postavljenih na motrilačkim lokacijama otvorenog prostora i serverske programske podrške za dohvat, provjeru, obradu, pohranu i prezentaciju podataka. Programska podrška sustava provodi kontinuirano motrenje štice

površine i obradu i analizu podataka u cilju detekcije šumskog požara, odnosno pojave dima ili vatre na slici i podacima. Sučelje korisnika izvedeno je kao web sučelje u kojem su korisniku u realnom vremenu dostupne slike s terena, informacije o požarnim alarmima i sučelje za pregled arhivskih snimki.



**Slika 2.** Distribuirana arhitektura sustava za inteligentni protupožarni nadzor i motrenje

Klijent-server arhitektura osigurava dostupnost sustava autoriziranim korisnicima s bilo kojeg mjesta na svijetu i s bilo kojeg računala. Međutim monolitna arhitektura sustava dopušta maksimalan broj od 3 motrilačke lokacije, odnosno 6 videokamera na jedan sustav. U slučaju potrebe za većim brojem lokacija upogonjeni su novi serveri s novom instalacijom programske podrške koji radi potpuno neovisno o prvom serveru.

Inicijativom da se sustavom protupožarnog videonadzora pokrije veća površina, prihvaćena je nova distribuirana arhitektura (Slika 2) koja dopušta proširenje sustava novim lokacijama, uz dovoljnu izolaciju procesa i podataka lokacije, ali s mogućnosti integracije prikaza podataka na jedinstvenom sučelju s jedinstvenom autorizacijom. Tako se distribuirana arhitektura odnosi na distribuciju podataka za obradu jednako kao i na njihovo prikupljanje.

## 5. Usporedba performansi monolitne i distribuirane arhitekture

Pored željenih efekata poboljšane skalabilnosti i lakšeg održavanja cjelokupnog sustava, usporedili smo i opterećenje resursa sustava organiziranog prema klasičnoj monolitnoj arhitekturi i novoj distribuiranoj.

Sustav organiziran kao monolitni sastoji se od tri motrilačke lokacije s po dvije videokamere, odnosno ukupno 6 videokamera čije se slike dohvaćaju i obrađuju te pohranjuju na jednom serveru. Opterećenje ovog sustava usporedili smo s opterećenjem virtualnog servera jedne lokacije, uz usporedbu iskorištene memorije i parametara rada procesora. Usporedba performansi dvaju arhitekture dana je u Tablici 1.

## 6. Zaključak

U ovom je radu opisana distribuirana arhitektura dizajnirana za potrebe sustava nadzora i motrenja sensorima prostorno raspoređenim po motrilačkim lokacijama. Cilj je bio omogućiti izolaciju motrilačkih lokacija, skalabilnost i integrirano korisničko sučelje. Predložena arhitektura temelji se na instalaciji virtualnih poslužitelja motrilačkih lokacija koji su zadušeni za dohvat, pohranu, obradu i isporuku podataka sa senzora lokacije. Osim željene skalabilnosti i lakšeg održavanja, kod ove arhitekture primijećeno je i optimalno korištenje računalnih resursa u odnosu na monolitnu arhitekturu. Zanimljivo je da je korištenje memorije sustava kod monolitne arhitekture veće nego kod virtualnog servera jedne lokacije. Razlog ovome je delegiranje poslova oko korisničkog sučelja i autentifikacije posebnom virtualnom serveru za integraciju informacija na web korisničkom sučelju.

**Tablica 1.** Rezultati usporedbe performansi

	Monolitna arhitektura	Distribuirana arhitektura
Broj spojenih kamera	6	2
Korišteno memorije (KiB)	26453350,2	3834604
Korišteno memorije po kameri (KiB)	4408891,7	1917302
Prekidi procesa (eng. SW Interrupt)	0,86	0,035
Slobodno vrijeme procesora (eng. CPU Idle)	21,36	61,495

## Literatura

- [1] SearchEnterpriseWAN (TechTarget) - What is a sensor network?, <https://searchenterprisewan.techtarget.com/What-is-a-sensor-network>, 12.07. 2018.
- [2] IoT Agenda - What is pervasive computing (ubiquitous computing)?, <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/pervasive-computing-ubiquitous-computing>, 12.7. 2018.
- [3] Friedewald M., Raabe O.: Ubiquitous computing: An overview of technology impacts, Science Direct, Telematics and Informatics, 2010, doi: 10.1016/j.tele.2010.09.001
- [4] ZDNet, Steve Ranger - What is the IoT? Everything you need to know about the Internet of Things right now, <https://www.zdnet.com/article/what-is-the-internet-of-things-everything-you-need-to-know-about-the-iot-right-now/>, 12.7. 2018.
- [5] Ning, H.: Unit and Ubiquitous Internet of Things, CRC Press, 2013, ISBN: 9781466561663
- [6] Ning H., Liu H., Yang L. T.: Aggregated-Proof Based Hierarchical Authentication Scheme for the Internet of Things, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 26(3), pp. 657-667, 2015, doi: 10.1109/TPDS.2014.2311791
- [7] CARNet: Virtualizacija računala, CCERT-PUBDOC-2009-12-285, <https://www.cis.hr/www.edicija/LinkedDocuments/NCERT-PUBDOC-2009-12-285.pdf>, 13.7.2018.



## Strengthening of timber floors with CLT panels – a numerical study

Žiga Unuk<sup>1</sup>, Vesna Žegarac Leskovar<sup>1</sup>, Miroslav Premrov<sup>1</sup>

(1) University of Maribor, Faculty of Civil Engineering, Transportation Engineering and Architecture, Slovenia, fgpa@um.si

### Abstract

The purpose of this article is to provide an insight into the field of timber floor strengthening with cross-laminated timber (CLT) panels. A classic timber floor strengthened with CLT panels is therefore analysed according to the current building standards in the European Union, the Eurocodes. Seven different CLT panels, with thicknesses from 60 mm to 120 mm, are taken into consideration for the numerical study. Self-tapping screws with a diameter of 6 mm and length of 200 mm are used as shear connectors. The gamma method is used for calculating the effective bending stiffness. The design procedure is briefly presented, and the results for different configurations are compared.

*Keywords: timber floors, cross laminated timber, self-tapping screws, composite floor*

## Ojačavanje podnih konstrukcija CLT pločama - numerička studija

### Sažetak

Cilj je ovog rada pokazati kako ojačati podne konstrukcije koristeći unakrsno laminirane drvene panele (CLT paneli). Kao predmet studije uzete su klasične drvene podne konstrukcije ojačane sa CLT panelima i uspoređene s Eurocode standardima, službenim graditeljskim standardom u EU-u. Sedam različitih tipova panela debljine od 60 do 120 mm su analizirani u numeričkoj studiji. Kao sredstvo sprežanja uzeti su samourezujući vijci promjera 6 mm i duljine 200 mm. Za proračun efektivne savojne krutosti korištena je gama metoda. U radu je kratko prikazana procedura dimenzioniranja te su uspoređeni rezultati različitih konfiguracija podnih konstrukcija.

*Ključne riječi: drveni podovi, unakrsno laminirano drvo, samourezujući vijci, spregnute podne ploče*

## **1. Introduction**

Timber floors present a significant part of the of the existing building fund, and they must often be structurally improved, due to various reasons. For example, due to a possible change of the category in use and consequently higher imposed loads. The timber-concrete composite (TCC) section has gained importance as a strengthening technique in the past years [1], as it strengthens the “out of plane” and “in-plane” behaviour of the timber floor simultaneously. On the other hand, the disadvantage with TCC is that a high amount of moisture is brought in to the building (due to concrete pouring) and that it is an irreversible strengthening method. In some instances, attention must also be given to the cultural heritage criteria. For example, in Italy, the timber-concrete approach for strengthening old timber floors is often rejected by responsible authorities due to claims that the measure is not reversible [2]. Instead of the concrete part of the TCC section, additional timber elements in the form of laminated or cross-laminated timber (CLT) are often used, which presents a dry technique for forming composite cross sections and is, therefore, preferred for timber floors of historical or cultural interest ([2,3]). The aim of this paper is, therefore, the provision of an insight into the field of timber floor strengthening with CLT panels. A numerical example of timber joists (of a timber floor) strengthened with CLT panels is studied. The CLT panels are installed on top of the existing timber joists and connected to the timber joists with self-tapping screws.

## **2. Numerical example setup**

### **2.1. Timber floor**

The numerical example deals with a 4.5 m long timber floor with a joist spacing of 90 cm. The joists have a cross section of 16 cm x 20 cm. Examples of typical timber floors are given in[4], where also old timber floor joist dimensions in relation to the floor span are presented. The strength class of the timber joists was defined as C24 and the serviceability class as S2.

### **2.2. CLT panels**

For the strengthening measure, seven different CLT panels with a width of 90 cm are studied, which is the same as the timber joist spacing. Their geometric properties are presented in Table 1. An index is assigned to each CLT panel. Note that the index 1 is assigned to the case with no CLT panel present (solely the timber joists). The letters L and C designate the longitudinal and transverse (cross) layers thickness. The outermost layers are always longitudinally oriented (in the direction of the floor span).

**Table 1.** Studied CLT panels

CLT panel index	Thickness [mm]	Layers	L [mm]	C [mm]	L [mm]	C [mm]	L [mm]
1	/	/	/	/	/	/	/
2	60	3	20	20	20	/	/
3	80	3	20	40	20	/	/
4	90	3	30	30	30	/	/
5	100	3	30	40	30	/	/
6	120	3	40	40	40	/	/
7	100	5	20	20	20	20	20
8	120	5	30	20	20	20	30

The mechanical properties of the timber class C24 are adopted for the mechanical properties of the CLT panels. Specific CLT properties can be found in Table 2.

**Table 2.** Material properties of CLT lamels

Characteristic rolling shear strength	$f_{vR,k}$	1.10	[MPa]
Rolling shear modulus	$G_{r,mean}$	50.00	[MPa]

### 2.3. Self-tapping screws

Self-tapping screws are used for the connections between the timber joists and CLT panels. The geometric properties are given in Table 3. Mechanical properties as the characteristic yield moment, characteristic embedding strength, characteristic axial withdrawal capacity, axial slip modulus are provided by the manufacturer in [5]. The screws are inclined at an angle of 45° with respect to the shear plane and oriented in a way that they are subjected to shear-tension loads. The screw row spacing is 8 cm (3 screws are placed in every row).

**Table 3.** Dimensions of self-tapping screws

Thread diameter [mm]	Core diameter [mm]	Length [mm]	Thread length [mm]
6	3.8	200	185

## 3. Structural calculation

To assess the load-bearing capacity of the given timber floor, an analysis is performed according to Eurocode 5 [6]. The calculations are performed in compliance with the so-called “gamma method” from Annex B of Eurocode 5 [6]. The shear connectors (self-tapping screws) stiffness calculations and structural checks are done according to the models provided in [7,8]. The combination factors for area category C3 were used.

The calculations of maximum imposed loads (Q) are carried out for different configurations with CLT panels (indexes from Table 1) and the Ultimate limit state and the Serviceability

limit state. The static system is a simply supported beam. The design strengths are used for strength verifications ( $X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M}$ ).

### 3.1. CLT panel effective bending stiffness

To calculate the effective bending stiffness  $(EI)_{ef}$  of the Timber-CLT composite floor, the gamma method is applied on two levels. The first level is solely the CLT panel cross-section which is basically already a composite cross-section with flexible connectors (the transverse layers of the CLT panels). According to [9] the  $\gamma$  coefficients for consideration of the flexibility of the transverse CLT layers are calculated with:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{(\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot d_{i,2})}{l^2 \cdot b_{clt} \cdot G_{R,i,2}}} \quad (1)$$

where  $E_i$  is the elastic modulus of the  $i$ -th CLT layer,  $A_i$  the cross section area of the  $i$ -th CLT layer,  $d_{i,2}$  the thickness of the transverse CLT layer between the  $i$ -th and second longitudinal CLT layer and  $G_{R,i,2}$  the rolling shear modulus of the transverse CLT layer between the  $i$ -th and second (longitudinal) CLT layer. This method is applicable for CLT panels with 3 or 5 layers, with the difference that the results for 3 layers give unsymmetrical interim results. In both cases, the second longitudinal layer (counted from the upper edge of the CLT panel) is the primary layer ( $\gamma_2 = 1$ ) and other layers are flexibly connected to it for the purpose of calculation.

The effective bending stiffness  $(EI)_{clt,ef}$  of the CLT floor is then defined with:

$$(EI)_{clt,ef} = \sum_{I=1}^N (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (2)$$

where  $E_i$  is the modulus of elasticity of the  $i$ -th longitudinal CLT layer,  $A_i$  cross-section area of the  $i$ -th longitudinal CLT layer,  $a_i$  the distance between the centres of gravity of the  $i$ -th longitudinal CLT layer and composite CLT cross-section,  $I_i$  moment of inertia of the  $i$ -th longitudinal CLT layer.

### 3.2. Composite floor effective bending stiffness

To calculate the effective bending stiffness  $(EI)_{ef}$  of the composite floor (timber joists strengthened with CLT panels), the gamma method is applied once again. The slip modulus  $K_i$  of the self-tapping screws is calculated according to [8] as a combination of the slip modulus for lateral loading and withdrawal loading of the self-tapping screws. The effective bending stiffness is calculated with Eq. (2), where the CLT layers are substituted with cross-section areas of the CLT longitudinal layers and the timber joist.

## 4. Results

Maximum imposed loads (Q) are calculated for the Ultimate limit state – Normal stress criterion of the timber joist (bottom edge normal stress which is a combination of tensile and

bending stress) and the Serviceability limit state – Final deflection criterion. For the maximum imposed load from the Ultimate limit state – Normal stress criterion of the timber joist several other structural checks are made:

- timber joist shear stress (conservatively the whole shear force is said to be resisted by the timber joist) – the “TS Util.” criterion denotes the utilisation of the timber joist shear strength
- CLT upper edge normal (bending and compression) stress – “CLT Util.” denotes the utilisation of the CLT panel compression and bending strength
- CLT rolling shear (the shear stress is calculated on the bottom edge of the CLT panel which is conservative as the rolling shear occurs in the transverse (flexible) layers)
- screw strength – the RS Util.” criterion denotes the utilisation of the CLT rolling shear strength and “JFM.” denotes the Johansen failure mode of the screw

The results for the ULS and SLS are given in Table 4. The index numbers are related to Table 1 and denote which CLT panel is considered for the calculation (index 1 denotes the case where only the timber joist is checked).

**Table 4.** Maximum imposed loads for the ULS (with additional checks) and SLS criteria

CLT panel index	ULS						SLS
	Q $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$	CLT Util.	Screw Util.	JFM	TS Util.	RS Util.	Q $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$
1	3.576	/	/	/	0.427	/	1.572
2	6.157	0.404	0.938	F	0.687	0.159	6.889
3	6.951	0.465	0.723	F	0.767	0.167	8.194
4	7.657	0.409	0.856	F	0.836	0.177	9.754
5	8.185	0.434	1.01	F	0.888	0.178	10.399
6	9.701	0.437	1.349	E	1.036	0.185	11.735
7	7.623	0.441	1.792	F	0.836	0.151	10.143
8	9.514	0.437	1.349	E	1.018	0.185	11.503

## 5. Conclusion

The results from Table 4 show that the timber floor can be effectively strengthened with the help of CLT panels, as already the thinnest CLT panel (CLT index 2, Table 1) strengthens the timber floor to achieve a load bearing capacity suitable for the area category C3 (minimum imposed load of  $5 \frac{kN}{m^2}$ ). It can also be seen that the second most critical criterion (after the tensile and bending strength of the timber joists) is the strength of the self-tapping screws. They govern the design when CLT panels with indexes 6-8 are used. For the strengthening measure with CLT panels with indexes 2-5 and 7, the failure mode of the screws is the failure mode F (embedding failure in both members and two plastic hinges in the shear plane). For CLT panels with indexes 6 and 8 the failure mode of the screws is the

failure mode E (embedment failure in the timber joist and one plastic hinge in member 1 – CLT panel), which is a consequence of the too low penetration length of the 200 mm long screw in the timber joist (for the 120 mm thick CLT panel:  $200\text{ mm} - \frac{120\text{ mm}}{\cos 45^\circ} \cong 30\text{ mm}$ ). Criteria such as the “CLT Util.,” “RS Util.” and “TS Util.” seem to be of minor importance. The SLS results from Table 4 show that the CLT panel positively affects deflections of the timber floor. It is interesting that the SLS maximum imposed load is lower than the ULS load for the timber floor without CLT panels (CLT index 1) and on the other hand the SLS maximum imposed loads for the strengthened timber floor are higher than the ULS maximum imposed loads (CLT indexes 2-8).

It has been shown that despite the strength of the individual parts of the composite cross-section (timber joists and CLT panels) also the self-tapping screws present an important load bearing element whose strength utilisation must be controlled. Considering the results from the structural calculation for the Timber-CLT composite floor it seems that this floor system has the potential to fulfil at least the structural criterion.

## **Acknowledgments**

The authors acknowledge the financial support from the Slovenian Research Agency (research core funding No. P2-0129).

## **References**

- [1] Yeoh, D., Fragiaco, M., De Franceschi, M., Heng Boon K.: State of the art on timber-concrete composite structures: Literature review. *J Struct Eng* 137(10):1085–95, 2010. Doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000353
- [2] Branco, J.M., Descamps, T., Tsakanika, E.: Repair and Strengthening of Traditional Timber Roof and Floor Structures. *Strengthening and Retrofitting of Existing Structures*, Springer, 113–38, 2018
- [3] Roensmaens, B., Van Parys, L., Carpentier, O., Descamps, T: Refurbishment of existing timber floors with screwed CLT panels. *Int J Archit Herit* 12(4):622–31, 2018. Doi: 10.1080/15583058.2018.1442522
- [4] Kolbitsch, A.: *Altbaukonstruktionen: Charakteristika Rechenwerte Sanierungsansätze*. Springer Vienna
- [5] ETA-Danmark A/S: European Technical Assessment ETA-12/0114 of 12/10/2017: SPAX self-tapping screws: Screws for use in timber constructions: Regulation (EU) No 305/2011, on the basis of: European Assessment document (EAD) no. EAD 130118-00-0603 “Screws for timber constructions,” n.d.
- [6] European Committee for Standardization. EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels: CEN
- [7] Bejtka, I., Blaß, H.J.: Joints with Inclined Screws. CIB-W18. paper 35-7-4, Kyoto, Japan
- [8] Tomasi, R., Crosatti, A., Piazza, M.: Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. *Constr Build Mater* 24(9):1560–71, 2010. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.007
- [9] Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J., Pock, K.: *Brettsperrholz Bemessung–Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode*. Cross Laminated Timber Des Des Accord Eurocode Vienna Austria ProHolz Austria, 2013

## Comparison of building's external wall components based on global warming potential

Maja Žigart<sup>1</sup>, Rebeka Kovačič Lukman<sup>2</sup>, Miroslav Premrov<sup>1</sup>, Vesna Žegarac Leskovar<sup>1</sup>

(1) University of Maribor, Faculty of Civil Engineering, Transportation Engineering and Architecture, Slovenia, {maja.zigart; miroslav.premrov; vesna.zegarac}@um.si

(2) University of Maribor, Faculty of Logistics, Slovenia, rebeka.lukman@um.si

### Abstract

Lowering environmental impacts in the operational phase of the building's life cycle has been achieved by introducing highly-insulated thermal envelopes in temperate and cold climates. However, the emissions and energy used in other life cycle phases should also be considered. The paper presents the comparison of the building's external wall components based on global warming potential in the production phase. Four types of construction (reinforced concrete, brick, cross-laminated timber and timber-frame) and three types of insulation materials (rock wool, expanded polystyrene and wood fibre) used within external wall components are analysed. Three heat transfer coefficients of the wall components were selected and compared. The results of the study demonstrate the potential of lowering environmental impacts of building external wall components by selecting suitable materials and present the solutions for the optimization of thermal envelopes in the design phase.

*Keywords: building's external wall components, global warming potential*

## Usporedba segmenata vanjskog zida zgrade na osnovu potencijala globalnog zagrijavanja

### Sažetak

Korištenje sofisticiranih termalnih izolacija u operativnoj fazi vijeka trajanja zgrade je značajno smanjilo utjecaj na okoliš u područjima blage i hladne klime, no potrebno je uzeti u obzir emisije i potrošnju energije u drugim fazama vijeka zgrade. U ovom će se radu prikazati usporedba segmenata vanjskog zida zgrade na osnovi potencijala globalnog zagrijavanja, ali u fazi proizvodnje građevinskih materijala. Posebno će se analizirati četiri tipa gradnje (armirani beton, cigla, unakrsno lamelirane drvene panele i drveni okvir) i tri tipa izolacijskog materijala (kamena vuna, ekspanzirani polistiren i drvna vlakna) koji su korišteni u segmentima vanjskog zida. Odabrana su i uspoređena tri koeficijenta provođenja topline za predmetne segmente zida. Rezultati analize su pokazali potencijal smanjenja utjecaja na okoliš segmenata vanjskog zida uslijed odabira odgovarajućih materijala što predstavlja rješenje optimizacije termalne izolacije u fazi projektiranja.

*Ključne riječi: segmenti vanjskog zida zgrade, potencijal globalnog zagrijavanja*

## **1. Introduction**

In 2010 buildings were responsible for 32 % of the total global final energy used and 19 % of energy-related greenhouse gas emissions [1]. For buildings constructed in temperate or cold regions, the major part of the life-cycle energy is used during the operational phase of the building [2]. During the past years, tighter regulations on the energy use of buildings have influenced a decrease of operational energy and environmental impacts in operational phase and increased the attention to other life cycle phases, especially the production phase. The low-energy buildings have a higher primary energy use for production than the conventional buildings, therefore it is essential to consider both production and operation phases when minimizing the life-cycle primary use of buildings [3]. One of the main aspects of increasing the energy efficiency of the buildings in temperate or cold regions is improving the buildings thermal envelope by lowering its thermal transmittance, but the environmental impact of highly insulated external wall components should also be analysed in the aspect of the production of building materials. Several studies analysed the environmental impacts of external wall components, for example, Bin Marsono & Balasbaneh [4] compared global warming potential of seven building schemes in Malaysia with different structural materials, however, no thermal insulation was added to external walls due to the hot weather conditions. Monteiro and Freire [5] compared seven alternative scenarios of exterior walls with thermal coefficients between 0.47 and 0.51 W/m<sup>2</sup>K for a Portuguese single-family house. Sierra-Perez et al. [6] conducted an environmental assessment study of three types of façade building systems for five climate conditions in Spain and highlighted the impacts of insulation materials. This research similarly to above-mentioned studies [4], [5], [6] considers global warming potential of buildings external wall components in the production phase but considers the design of low-energy buildings with highly insulated thermal envelopes located in Central Europe.

## **2. Methodology**

Life Cycle Assessment (LCA) addresses the environmental aspects and potential environmental impacts throughout a product's lifecycle. [7] In the field of building sustainability assessment the LCA is a preferred method for evaluating the environmental performance of the whole building, its materials or components. This study is based on a comparison of external wall components with four structural systems commonly used for the design of low-rise energy-efficient buildings located in Slovenia and other Central-European countries: reinforced concrete (RC), brick (B), cross-laminated timber (CLT), and timber-frame panel (TF) construction. Three types of insulation types used as external thermal insulation composite system are compared: rock wool (RW), expanded polystyrene (EPS) and wood fibre (WF) insulation.

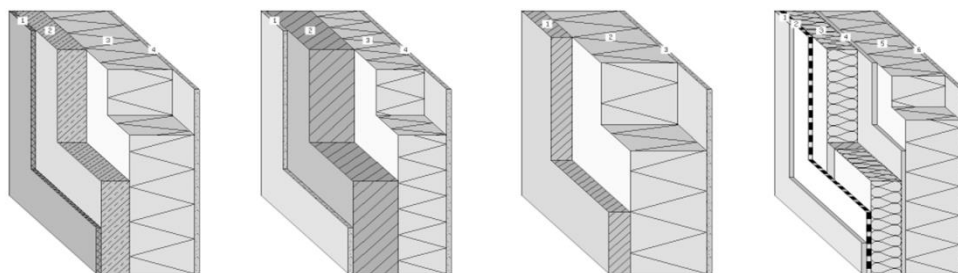
The analysis was carried out with the use of "Baubook construction calculator" [8] providing a free open-source database. The boundaries of LCA are defined as cradle-to-gate, taking into account the production phase with processes of the extraction of raw materials (A1), transport to a manufacturer (A2), and manufacturing (A3), according to EN 15978 [9].



The functional unit of the LCA study is defined as 1 m<sup>2</sup> of external wall component, with selected heat transfer coefficient (U-value) expressed in W/m<sup>2</sup>K. To evaluate the environmental performance of various external wall components the current paper presents the global warming potential (GWP) for a time horizon of 100 years expressed in kg carbon dioxide/kg emission, in accordance with CML 2001 v3.9 [10]. Presented indicator GWP includes both, the contribution to global warming regarding greenhouse gas emissions and the quantities of carbon dioxide stored in the biomass.

## 2.1. Description of external wall components

In Figure 1 four types of external wall components are presented. All the analysed wall types consist of the construction (concrete, brick, CLT, timber), thermal insulation and finishing (gypsum filler, plaster etc.). Different insulation types (see Table 1) and layer thicknesses were selected to obtain the same heat transfer coefficient in the compared wall envelope components. Compared heat transfer coefficient for walls with averages of  $U_1 = 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $U_2 = 0.165 \text{ W/m}^2\text{K}$  and  $U_3 = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$  comply with heat transfer coefficients mostly used for new energy-efficient buildings in the countries with cold winter and warm summer climate conditions.



RC	B	CLT	TF
0.3 cm gypsum filler	1.5 cm lime cement finish plaster (1800 kg/m <sup>3</sup> )		1.5 cm gypsum plasterboard (900 kg/m <sup>3</sup> ) 0.18 cm polyethylene (PE) vapour brake
16 cm reinforced concrete (1% of reinforcement) (2300 kg/m <sup>3</sup> )	30 cm vertically perforated brick + thin-bed mortar or glued using PUR (675 kg/m <sup>3</sup> )	9.5 cm cross-laminated timber, glued, external use (475 kg/m <sup>3</sup> )	16 cm (13%) 8 cm timber (475 kg/m <sup>3</sup> ) - rough, technically dried (87%) glass wool (18 kg/m <sup>3</sup> ) 1.5 cm gypsum plasterboard (900 kg/m <sup>3</sup> )
thermal insulation alternatives	thermal insulation alternatives	thermal insulation alternatives	thermal insulation alternatives
0.19 cm silicate plaster (without synthetic resin additive)	0.19 cm silicate plaster (without synthetic resin additive)	0.19 cm silicate plaster (without synthetic resin additive)	0.19 cm silicate plaster (without synthetic resin additive)

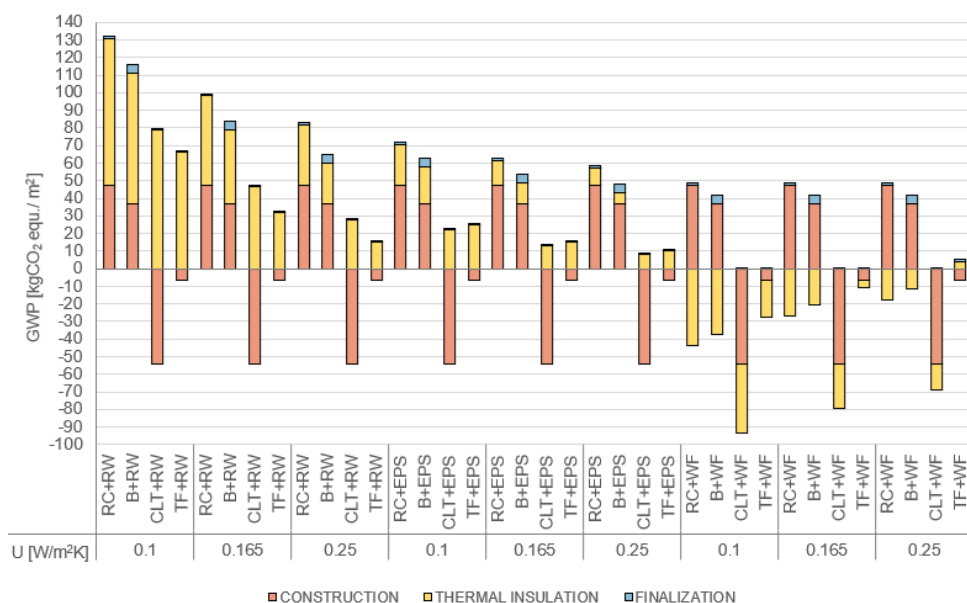
Figure 1. Building's external wall components

**Table 1.** Properties of thermal insulation alternatives

Thermal insulation alternatives	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal conductivity [W/mK]	GWP per mass [kgCO <sub>2</sub> equ./kg]
Rock wool (RW)	120	0.039	1.93
Expanded polystyrene (EPS)	15.8	0.040	4.17
Wood fibre (WF)	130	0.046	-0.804

### 3. Results and discussion

In Figure 2 the global warming potential of external wall components are presented.



**Figure 2.** Global warming potential of external wall components

Concerning the production phase of external wall components, both construction and thermal insulation material have high impacts on overall global warming potential of external wall components. Timber structures, especially the cross-laminated timber (CLT) show negative global warming potential, due to the quantities of carbon dioxide sequestered in the biomass. However, it is necessary to point out that the negative impacts on GWP because of carbon sequestration considering other life-cycle phases are only achievable in the case of proper disposal and waste processing of building materials. The reinforced concrete presents with the highest global warming potential in comparison with structural materials. Analysis of thermal insulation materials used for non-ventilated façade system shows the rock wool insulation has the highest global warming potential. External wall components with RW insulation and  $U = 0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$  have at least 45 % higher GWP potential than

components with EPS insulation. However, when comparing the GWP of thermal insulations concerning the mass (see Table 1), the RW insulation shows better environmental performance than EPS insulation. For non-ventilated façades without any substructure in the thermal insulation element, only the RW insulation with high density ( $120 \text{ kg/m}^3$ ) is applicable, thus representing worse environmental performance than EPS when comparing  $1 \text{ m}^2$  of wall components. Selection of wood fibre insulation represents a good alternative to RW or EPS insulation considering global warming potential on account of sequestered carbon in the wood fibres. WF insulation as a substitute to RW insulation can contribute to at least 85 % lower GWP of the wall component and in the case of substitution with EPS, the reduction of GWP is at least 40 %.

When comparing whole wall components, it is seen from Figure 2 that TF construction with RW insulation and  $U=0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$  has a similar GWP as brick construction with EPS insulation. In the optimization of external wall envelope, all the materials within a wall component should be chosen carefully, especially when comparing wall components with low thermal transmittances.

#### **4. Conclusion**

The global warming potential analysis of external wall components shows that both construction and insulation materials overtake a large impact share on GWP. Comparison of construction materials shows that the timber construction systems present with lowest GWP, due to the carbon sequestered in the biomass. The CLT construction had the lowest environmental impact due to the largest quantities of biomass in the wall components. The RW insulation showed the highest footprint in the production phase, considering the thermal insulation materials, therefore EPS and WF insulations present as better alternatives for non-ventilated facades without additional substructures.

The results of the study show possibilities for optimization of building envelopes by identifying the critical materials. The comparison of global warming potential of building's external wall components can serve as a guideline for designers and developers in the design of low-energy buildings in temperate and cold climates.

The extended paper of this research with additional environmental indicators and in-depth analysis of building envelope components has already been published in the international scientific journal [11].

#### **References**

- [1] Lucon, O., Ürge-Vorsatz, D., Zain Ahmed, A., Akbari, H., Bertoldi, P., Cabeza, L.F., Eyre, N., Gadgil, A., Harvey, L.D.D., Jiang, Y., Liphoto, E., Mirasgedis, S., Murakami, S., Parikh, J., Pyke, C., Vilariño, M.V.: Buildings. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel,

- T. Minx, J.C. (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 671-738, 2014.
- [2] Adalberth, K.: Energy use in four multi-family houses during their life cycle, *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, pp. 1-22, 2000.
- [3] Joelsson, A.: Primary Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Mitigation in Residential Buildings, Doctoral thesis, Department of Engineering and Sustainable Development Mid Sweden University, Östersund, Sweden, 2008.
- [4] Bin Marsono, A.K., Balasbaneh, A.T.: Combinations of building construction material for residential building for the global warming mitigation for Malaysia, *Construction and Building Materials*, 85: pp 100-108, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.083
- [5] Monteiro, H., Freire, F.: Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods, *Energy and Buildings*, 47: pp. 572-583, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.032
- [6] Sierra-Perez, J., Boschmonart-Rives, J., Gabarrell, X.: Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 113, pp. 102–113, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.090
- [7] ISO 14044:2016 Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines. International Organisation for Standardization. Geneva, Switzerland, 2016.
- [8] “Baubook” - Die Datenbank für ökologisches Bauen & Sanieren, Energieinstitut Vorarlberg & Österreichische Institut für Baubiologie und -ökologie GmbH
- [9] EN 15978:2011. Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. The European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2012.
- [10] Guinée, J.B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R.; Koning, A. de, Oers, L. van, Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, H. de, Duin R. van, Huijbregts, M.A.J.: Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 692, 2002.
- [11] Žigart, M., Kovačič Lukman, R., Premrov, M., Žegarac Leskovar, V.: Environmental impact assessment of building envelope components for low-rise buildings. *Energy*, 163, pp. 501-512, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.149



<http://www.zt2018.org>  
[zajednicki.temelji@gradst.hr](mailto:zajednicki.temelji@gradst.hr)

ISBN 978-953-6116-77-5  
Split, 2018.