

## 9. simpozij doktorskog studija građevinarstva, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 14. rujna 2023 : zbornik radova

---

Milić, Petra; Kušter Marić, Marija; Tkalčić, Domagoj; Milovanović, Bojan;  
Vugrinec, Tomislav; Kišiček, Tomislav; Zovko, Ivana; Bartolac, Marko;  
Galić, Josip; Rakas, Nika; ...

**Edited book / Urednička knjiga**

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

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:091784>

<https://doi.org/https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2023>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-06**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# 9. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet  
14. rujna 2023.

## Zbornik radova

urednica  
ANA BARIČEVIĆ



**Izdavač**

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Fra Andrije Kačića-Miošića 26  
10000 Zagreb

**Urednica**

izv. prof. dr. sc. Ana Baričević

**Dizajn naslovnice**

minimum d.o.o.

**Prijelom**

Tanja Vrančić

**Tisak**

Tiskara Zelina d.d., 2023.

**Naklada**

100 kom.

**ISSN**

ISSN 2991-4892 (Online)

ISSN 2991-3705 (Tisak)

**DOI**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2023>

Zagreb, rujan 2023.

*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 nanesenu 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 samo uz pismenu suglasnost izdavača. Manji dijelovi mogu se reproducirati samo uz odgovarajuće citiranje izvora.*

# **9. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA**

**14. rujna 2023., Zagreb**

## **Zbornik radova**

Urednica  
**Ana Baričević**

## Organizacijski odbor simpozija

izv. prof. dr. sc.	<b>Ana Baričević</b>	Prodekanica za znanost
izv. prof. dr. sc.	<b>Mario Bačić</b>	Zavod za geotehniku
izv. prof. dr. sc.	<b>Ivan Halkijević</b>	Zavod za hidrotehniku
prof. dr. sc.	<b>Davor Skejić</b>	Zavod za konstrukcije
izv. prof. dr. sc.	<b>Dora Pokaz</b>	Zavod za matematiku
izv. prof. dr. sc.	<b>Marija Jelčić Rukavina</b>	Zavod za materijale
prof. dr. sc.	<b>Mladen Vukomanović</b>	Zavod za organizaciju, tehnologiju i menadžment
izv. prof. dr. sc.	<b>Ivo Haladin</b>	Zavod za prometnice
izv. prof. dr. sc.	<b>Ana Skender</b>	Zavod za tehničku mehaniku
izv. prof. art. dr. sc.	<b>Silvio Bašić</b>	Samostalna Katedra za zgradarstvo

## Predgovor

Već devetu godinu zaredom Simpozij doktorskog studija građevinarstva okuplja doktorande i njihove mentore. Utemeljen 2015. godine kako bi podržao razvoj istraživačkog rada, potaknuo usvajanje znanstvene metodologije i kritičkog mišljenja među doktorandima, Simpozij je danas nezaobilazno događanje u akademskome kalendaru Građevinskog fakulteta. Kroz godine održano je više od 140 predavanja koja su doktorandima omogućila da steknu dragocjeno iskustvo u ranim istraživačkim danima.

Ove godine osim predavanja doktoranada zanimljive sekcije posvećene su usavršavanju njihovih vještina i mobilnosti. Tako će u sklopu Simpozija Jelena Bodganović, voditeljica Knjižnice Građevinskoga fakulteta, organizirati radionicu "Vrednovanje i pretraživanje e-izvora informacija". U početnoj fazi doktorskoga istraživanja vještine učinkovitoga pretraživanja relevantne literature i pravilno vrednovanje izvora informacija od iznimne su važnosti i zato je cilj radionice educirati mlade istraživače o alatima i tehnikama koji su ključni za pregled bibliografskih i citatnih baza te baza cjelovitih tekstova.

Mogućnosti mobilnosti mladih istraživača u sklopu instrumenta EU-a Djelovanja Marie Skłodowska-Curie i inicijative EURAXESS u ime Agencije za mobilnost i programe Europske unije predstaviti će Ivan Makovec. Fakultet kontinuirano ulaže sredstva u dodatno obrazovanje i usavršavanje svojih zaposlenika, s posebnim fokusom na podršku mladim istraživačima. Na okruglome stolu "Važnost mobilnosti za mlade istraživače" sudjelovat će zaposlenici Fakulteta, koji su se u protekloj akademskoj godini usavršavali u drugim institucijama, i to upravo zahvaljujući sredstvima Građevinskog fakulteta. Cilj je okrugloga stola istaknuti moguće izvore financiranja mobilnosti, ali i važnost obrazovanja izvan matične institucije za akademski razvoj mladih istraživača.

Kao i svake godine do sada, izlaganja doktoranada obuhvaćaju zanimljive i aktualne teme od iznimne važnosti za područje građevinarstva. Ove godine nazočni će imati priliku čuti izlaganja 11 doktoranada, a neke od tema su utjecaj klimatskih promjena na trajnost građevina, ocjena potresne oštećljivosti građevina, analiza toplinskih mostova i prohodnost vojnih vozila. Upravo kroz izlaganja, razgovore i rasprave doktorandi stječu dragocjeno iskustvo koje im pomaže pri izradi doktorske disertacije.

Kako je Simpozij postao nezaobilazno događanje u akademskome kalendaru Građevinskog fakulteta, s radošću iščekujemo ovogodišnji, deveti Simpozij doktorskog studija građevinarstva!

Zagreb, kolovoz 2023.

Urednica  
  
izv. prof. dr. sc. **Ana Baričević**



# Sadržaj

Predgovor .....	5
Utjecaj klimatskih promjena na predviđanje uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija Petra Milić, Marija Kušter Marić.....	9
Primjena računalnih modela za analizu i smanjenje toplinskih mostova u građevinama Domagoj Tkalčić, Bojan Milovanović .....	23
Primjena FRP armature kod armiranja montažnih fasadnih sendvič panela Tomislav Vugrinec, Tomislav Kišiček .....	33
Utjecaj topološke optimizacije na povećanje otpornosti stupa na izvijanje Ivana Zovko, Marko Bartolac, Josip Galić.....	43
Procjena oštetljivosti armiranobetonskih zgrada u gradu Zagrebu Nika Rakas, Josip Atalić, Marta Šavor Novak .....	53
Istraživanje utjecaja krutih podzemnih dijelova građevine na ponašanje konstrukcije tijekom potresa Thomas Holger Taetzsch, Josip Atalić .....	61
Procjena oštetljivosti zidanih zgrada u gradu Zagrebu Ivan Kosalec, Josip Atalić, Marta Šavor Novak.....	71
Seismic vulnerability of vernacular heritage masonry churches in continental Croatia – framework proposal David Anđić, Mislav Stepinac.....	81
Primjena potresnih izolatora u modularnim čeličnim zgradama Besmir Ismaili, Ana Skender .....	89
Analiza utjecaja primjene geomreža na mehanizam loma u tlu kod plitkog temeljenja Ivana Gredelj, Saša Ahac .....	99
Usporedba i analiza pristupa stručnom nadzoru građenja u Republici Hrvatskoj, Velikoj Britaniji i Saveznoj Republici Njemačkoj Slaven Imprić, Mladen Vukomanović .....	109
Izješća o provedenom dodatnom obrazovanju i usavršavanju zaposlenika.....	125
Sažeci obranjenih doktorskih radova: rujan 2022. - srpanj 2023 .....	141





# Utjecaj klimatskih promjena na predviđanje uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija

Petra Milić<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Marija Kušter Marić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BBR Adria, Zagreb, Hrvatska, petramilic7@gmail.com

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marija.kuster.maric@grad.unizg.hr

## Sažetak

Prodor klorida u betonu uzrokuje koroziju armature sa posljedicama oštećenja, smanjenja uporabnog vijeka i otkazivanja konstrukcija. Proces prodora klorida je pod velikim utjecajem klime i okoliša. Istraživanje utjecaja klimatskih promjena na prodor klorida te uključivanje u modele u svrhu predviđanja uporabnog vijeka omogućit će adekvatno gospodarenje konstrukcijama. U radu je dan osvrt na modeliranje prodora klorida, utjecaj klimatskih promjena na konstrukcije te su analizirani neki od suvremenih modela prodora klorida s naglaskom na uključivanje utjecaja klimatskih promjena.

*Ključne riječi: korozija armature, prodor klorida, inicijacija korozije, klimatske promjene, numerički modeli, održavanje konstrukcija*

## Climate change effect on service life prediction of reinforced concrete structures

### Abstract

Chloride ingress in concrete causes corrosion of reinforcement, resulting in damage, service life reduction and collapse of structures. Climate and environmental conditions directly affect chloride ingress process. Exploring the effects of climate change on chloride ingress and including it into the chloride ingress models for service life prediction will enable proper management of structures. This paper gives a review on modelling of chloride ingress, effects of climate change on structures. Finally, an analysis of some current chloride ingress models was given with emphasis on considering the effects of climate change.

*Key words: reinforcement corrosion, chloride ingress, corrosion initiation, climate change, numerical models, assessment of structures*

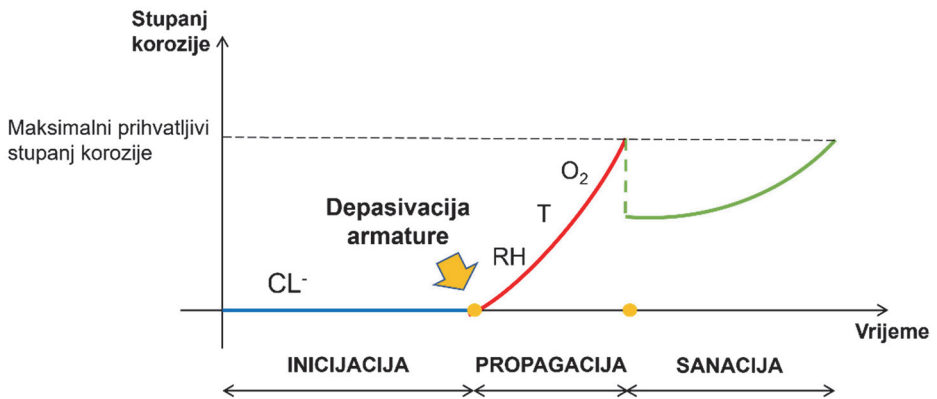
## 1 Uvod

Armiranobetonske i prednapetobetonske su među najmnogobrojnijim suvremenim konstrukcijama. Takve konstrukcije se smatraju dugotrajnim, ali ostvarenje projektiranog uporabnog vijeka bez potreba za većim popravcima i sanacijama često je problematično posebice za konstrukcije s dužim zahtijevanim uporabnim vijekom. Jedan od najčešćih uzroka oštećenja, smanjenja životnog vijeka i otkazivanja armiranobetonskih konstrukcija je korozija armature [1, 2]. Armatura je u betonu zaštićena slojem željezovog oksida nepropusnog za reaktante korozije. Međutim, pasivni sloj je u potpunosti postojan samo u alkalnom mediju ( $\text{pH} > 9,5$ ). Dva osnovna uzroka pojave korozije armature u betonu su smanjenje  $\text{pH}$  vrijednosti betona uslijed karbonatizacije betona (reakcija produkata hidratacije s  $\text{CO}_2$ ) i djelovanje klorida [3]. Korozija smanjuje poprečni presjek i duktilnost armaturene šipke i prionjivost između armature i betona. Produkti korozije su većeg volumena od početnog volumena armature što uzrokuje dodatna naprezanja, dolazi do otvaranja pukotina te mogućeg odlamanja zaštitnog sloja betona. Sve to utječe na kapacitet nosivosti i krutost konstrukcije [3-5].

Trajnost konstrukcija je uvjetovana projektiranjem, građenjem i održavanjem, ali također i okolišem i klimom. Klimatske promjene ubrzavaju procese degradacije. Klimatski parametri s značajnijim utjecajem na koroziju armature u betonu su temperatura i relativna vlažnost, a predviđa se primjetna promjena njihovih vrijednosti u budućnosti [6]. Mnoga istraživanja potvrđuju utjecaj klimatskih promjena na skraćivanje faze inicijacije, povećanje širine pukotina i sl. [2, 7-10]. Zbog toga je nužno pravilno projektiranje konstrukcija, ali i adekvatno gospodarenje i održavanje. U sklopu gospodarenja građevinama, važno je predvidjeti buduću degradaciju i preostali uporabni vijek građevine. To je moguće korištenjem modela degradacije i predviđanja uporabnog vijeka [11]. Unatoč razvitku brojnih modela predviđanja uporabnog vijeka, zbog kompleksnosti procesa korozije njihova sveobuhvatnost, preciznost i primjena na postojeće konstrukcije još uvijek nije na zadovoljavajućem nivou [11]. Ovaj rad fokusiran je na modeliranje prodora klorida u svrhu predviđanja uporabnog vijeka. Opisani su glavni procesi pri modeliranju prodora klorida i istaknute neke od nesigurnosti pri modeliranju, dan je osvrt na neka od provedenih istraživanja utjecaja klimatskih promjena na koroziju armature te su analizirani neki od suvremenih modela prodora klorida.

## 2 Modeliranje prodora klorida

Proces korozije se može podijeliti na fazu inicijacije, propagacije i fazu sanacije (Slika 1). Faza inicijacije počinje prodorom klorida u beton. Faza propagacije započinje kada je na razini armature dosegnuta kritična koncentracija klorida u betonu zbog čega dolazi do razaranja pasivnog sloja željezovog oksida na armaturi te započinje elektrokemijski proces korozije šipke armature [12, 13]. Prilikom sanacije AB konstrukcije oštećene korozijom, obično se zaštitni sloj betona, kontaminiran kloridima i oštećen pukotinama izazvanom korozijom, djelomično ili potpuno odstranjuje i mijenja novim slojem betona ili reparaturnog morta u kojima je početna koncentracija klorida nula, dok je u dubljem slojevima starog betona koncentracija klorida veća od nule, a manja od kritične vrijednosti. Stoga je model prodora klorida nakon sanacije konstrukcije složeniji model.



Slika 1. Faze procesa korozije

Općenito, model je skup definicija, parametara, koeficijenata i funkcija koji simuliraju određeni proces ili sustav. Za uspješan model potrebni su kvalitetni ulazni podaci, jasno i točno definirani procesi, njihovi međusobni odnosi i interakcije koje će dovesti do krajnjeg rezultata. Cilj modeliranja prodora klorida je određivanje koncentracije klorida na dubini armature u betonu te usporedbom sa kritičnom koncentracijom klorida predviđanje trenutaka u kojem će ona biti premašena [14]. U posljednja četiri desetljeća razvijeni su mnogi modeli prodora klorida u svrhu predviđanja uporabnog vijeka konstrukcija, različite složenosti i uz različite metode proračuna. Međutim, još uvijek uključuju mnoge nesigurnosti vezane za karakteristike materijala, transportne, elektrokemijske i mehaničke procese ili njihovu međusobnu interakciju.

## 2.1 Transportni procesi prodora klorida

Većina postojećih modela pretpostavljaju difuziju klorida dominantnim procesom transporta klorida. Osnove difuzije su opisane 1. i 2. Fickovim zakonom. Na ovim zakonima bazirana je i većina modela prodora klorida. Prvi Fickov zakon glasi:

$$F = -D_0 \cdot \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

gdje je,  $F$  tok difuzije klorida [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ],  $D_0$  početni koeficijent difuzije klorida u betonu [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $C$  ukupna količina klorida u betonu [ $\text{kg}/\text{m}^3$  betona], a  $x$  dubina betona (mjerena od izložene površine) [ $\text{m}$ ]. Izraz  $dC/dx$  je koncentracijski gradijent klorida tj. promjena količine klorida po dubini betona. Koeficijent difuzije označava količinu tvari koja u jedinici vremena prođe kroz jedinični presjek pri promjeni koncentracije klorida  $dc/dx=1$ . Fickov prvi zakon dakle, govori da je tok difuzije klorida u jedinici vremena kroz određeno područje proporcionalan gradijentu koncentracije kloridnih iona u tom području. Negativan predznak označava transport klorida suprotno od povećanja gradijenta koncentracije, tj. od područja veće koncentracije prema području manje koncentracije. Fickov prvi zakon pretpostavlja konstantan koeficijent difuzije ( $D = D_0$ ). Primjenjiv je kod stacionarnog, jednosmjernog i konstantnog toka. Kod armiranobetonskih konstrukcija tok nije stacionaran, a koncentracija klorida mijenja se kroz vrijeme. Takvi uvjeti opisani su drugim Fickovim zakonom koji predstavlja zakon o očuvanju mase u beskonačno malom volumenu otopine. *Zakon očuvanja mase nalaže da promjena toka difuzije klorida mora biti proporcionalna sa promjenom ukupne količine klorida u betonu. Fickov drugi zakon glasi:*

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{dF}{dx} = D_0 \cdot \frac{d^2C}{d^2x} \quad (2)$$

gdje je,  $t$  vrijeme [ $\text{s}$ ],  $dC/dt$  promjena količine klorida u betonu u vremenu, a  $d^2C/d^2x$  promjena toka difuzije klorida po dubini betona. Pretpostavke su da je koeficijent difuzije klorida konstantan, da su pore betona u potpunosti saturirane te da je beton neraspucan što naravno nije stvarno stanje armiranobetonskih konstrukcija u eksploataciji [15, 16].

Fickovi zakoni su parcijalne diferencijalne jednadžbe, koje se mogu riješiti analitički i numerički. Analitičko rješenje je jednostavnije za primjenu, uz određena ograničenja. Njegova primjena je moguća jedino na jednodimenzionalnom mediju, sa konstantnim jednosmjernim koeficijentom difuzije pri konstantnoj površinskoj koncentraciji klorida, vlažnosti i temperaturi. Numeričko rješenje nema toliko limitacija. Može se koristiti pri površinskoj koncentraciji klorida promjenljivoj u vremenu te

omogućuje uvrštavanje i drugih lokalnih uvjeta. Minimum rubnih uvjeta koji bi tada trebao biti definiran su koncentracija klorida, temperatura i relativna vlažnost na površini betona u ovisnosti o vremenu [15].

Glavni izvori klorida u betonu su morska voda i sol za odleđivanje kojom se posipaju ceste. Konstrukcije pod morem imaju dugotrajnu i konstantnu koncentraciju klorida na površini. Kod konstrukcija u blizini mora i onih koje se posipaju sa soli za odleđivanje, površinska koncentracija klorida je promjenjiva u vremenu. Konstrukcije u zoni oseke i plime ili zoni zapljuskivanja, kao i konstrukcije cestovne infrastruktura izložene su ciklusima vlaženja i sušenja te pore u betonu nisu u potpunosti ispunjene vodom. To dodatno otežava određivanje rubnih uvjeta, ali i transportne procese i njihovo modeliranje. Tada je, uz difuziju važno uključiti i druge transportne procese kao što su konvekcija, apsorpcija, transport kapilarne vode, transport zbog razlike u tlakovima, vezivanje klorida. U nesaturiranim uvjetima dominantan proces je konvekcija, koja se događa puno brže od difuzije [14, 15].

Veliki utjecaj na rezultate modela ima koeficijent difuzije. Koeficijent difuzije je mjera kretanja kloridnih iona [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]. To nije parametar materijala, već ovisi o mnogim uvjetima, npr. temperatura, relativna vlažnost, stupanj hidratacije, dubina betona i dr.

Mnogi modeli ne uzimaju u obzir raspucavanje betona tijekom uporabe, a gotovo je uvijek prisutno kod realnih konstrukcija. Pukotine nastaju pod utjecajem mehaničkog opterećenja, termalnih naprezanja, puzanja i skupljanja kada je dosegnuta vlačna čvrstoća betona. Svako dodatno vlačno naprezanje dovodi do širenja postojećih ili stvaranja novih pukotina [17]. Što su pukotine šire omogućavaju lakši i direktniji prolaz agresivnih tvari do armature. Utjecaj pukotina na koroziju ovisi i o smjeru pukotine [18].

Nadalje, kritična koncentracija klorida pri armaturnoj šipki, pri kojoj će započeti razaranje zaštitnog pasivnog sloja nije jednoznačno definirana. Ovisi o vrsti veziva, porijeklu klorida, omjeru slobodnih i vezanih klorida u betonu, omjeru kloridnih CL- i hidroksilnih OH- iona u pornoj otopini, vodocementnom omjeru, vrsti armature, temperaturi, relativnoj vlažnosti i dr. [18, 19]. Ipak, vrijednost kritične koncentracije vezanih i slobodnih klorida na razini armature se prema [20] uzima kao 0.40 % klorida na masu cementa. Za tipičnu betonsku mješavinu, s količinom cementa od 350 do 400  $\text{kg}/\text{m}^3$  to iznosi oko 0.05 % mase betona.

### 3 Utjecaj klimatskih promjena na koroziju

Procesi prodora klorida u betonu i korozije armature pod utjecajem su klimatskih čimbenika. Među najistaknutijima su temperatura i relativna vlažnost. Klimatske promjene se već događaju i značajna su prijetnja 21. stoljeća. Posljednja tri desetljeća su bila sukcesivno najtoplija od 1850., temperatura oceana je narasla, ekstremni vremenski uvjeti su sve učestaliji [6].

Stoga ne čudi da su utjecaji klimatskih promjena na prodor klorida tema brojnih istraživanja. U istraživanju fokusiranom na mostove u Kini [7] promatran je utjecaj promjene temperature na prodor klorida. Prodor klorida je modeliran procesom difuzije, a površinska koncentraciju klorida je smatrana konstantom. Prema podacima IPCC-a (Međuvladin panel o klimatskim promjenama) određena je krivulja porasta prosječne temperature do 2100. g. za dva scenarija koji odgovaraju srednjem te visokom scenariju emisije u budućnosti (RCP4.5, RCP8.5). Nesigurnosti modela projekcije iskazane su kao donja i gornja granica vrijednosti porasta temperature. Prosječna temperatura definiranog referentnog scenarija odgovara onoj iz 2000. godine. Rezultati pokazuju da su koncentracije klorida pri armaturi za 2100 g. 6 do 15 % veći za scenarije sa povećanjem temperature u usporedbi sa referentnim scenarijem što potvrđuje da povećanje temperature ubrzava prodor klorida [7]. Ovisno o scenarijima klimatskih promjena i uvjetima izloženosti [8, 9] pokazuju povećanje vjerojatnosti inicijacije korozije do 20 %. Prema [10], vrijeme dostizanja kritične koncentracije klorida kraće je od 13 % do 39 % za 2100. u usporedbi sa referentnim scenarijem bez klimatskih promjena. Istraživanje je fokusirano na mostove u području velikog snježnog opterećenja u SAD-u. U model prodora klorida uz promjene temperature i relativne vlažnosti, uključeno je i povećanje površinske koncentracije klorida kao posljedica veće potrošnje soli za odleđivanje u budućnosti. Promjena temperature je definirana prosječnom vrijednosti porasta temperature, vrijednošću njene donje i gornje granice u 2100. godini i to prema podacima IPCC-a za četiri scenarija klimatskih promjena. Dakle, svaki scenarij klimatskih promjena je predstavljen sa tri slučaja vrijednosti promjene temperature u 2100. Zbog nesigurnosti projekcija relativne vlažnosti, svakoj vrijednosti porasta temperature pridružena su tri slučaja, porast, pad te bez promjena vrijednosti relativne vlažnosti (+0.25, -0.25, 0.00). Također, svakom od četiri scenarija klimatskih promjena je pridružena vrijednost porasta površinske koncentracije klorida, i to redom +5 %, +10 %, +15 %, +20 % od najblažeg do najnegativnijeg scenarija. Model uključuje transportne procese difuzije, konvekcije, difuzije vlažnosti, transporta topline i vezanje klorida. Bastidas-Arteaga, Schoefs et al. [2] su istraživali utjecaj klimatskih promjena na armiranobetonskom grednom nosaču u okolišima sa prisutnošću klorida. Model uključuje procese difuzije, konvekcije, vezanja klorida, difuzije vlažnosti i transporta topline, rubni uvjeti su promjenjivi u vremenu, a koeficijent difuzije ovisi o nizu parametara.

Utjecaji klimatskih promjena uključuju promjene temperature, relativne vlažnosti i promjene trajanja hladne sezone tijekom godine. Definirana su dva scenarija klimatskih promjena, očekivani i pesimistični, za koje je određena vrijednost klimatskih parametara na kraju analiziranog perioda od 100 godina. Također, razmatrana su tri tipa klimatskog modela. Konstantni klimatski model vrijednosti temperature i relativne vlažnosti u određenoj godini analiziranog perioda modelira linearnom funkcijom u vremenu te je njihova vrijednost konstantna tijekom jedne godine (prosječna vrijednost godine). Drugi klimatski model odvaja godinu na dva razdoblja te razmatra srednje sezonske vrijednosti. Treći model stohastičkim procesima uključuje nasumične vrijednosti klimatskih parametara tijekom sezone. Istraživan je utjecaj klimatskih promjena na vrijeme do otkazivanja tj. do dostizanja graničnog stanja nosivosti savijanjem. Između ostalog, rezultati pokazuju smanjenje vremena otkazivanja do 31 % za uvjete morskog okoliša, a do 19,9 % za uvjete tropskog okoliša u usporedbi sa scenarijem bez klimatskih promjena. Iz tog se može zaključiti da klimatske promjene imaju veći utjecaj na okoliš sa velikim sezonskim promjenama temperature i relativne vlažnosti. Bitnu uloga pristupa modeliranja klimatskih parametara pokazuju rezultati gdje se ista vrijednost vjerojatnosti otkazivanja dostiže za 62, 77 i 120 godina uz redom, stohastički, vremenski ovisan i konstantni model klime [2].

#### **4 Pregled postojećih modela**

Modeliranje transportnih procesa klorida i procesa korozije je predmet istraživanja desetljećima. Prvi model je definirao Bažant, 1979. godine. Vrijeme do razvoja pukotina u fazi propagacije bilo je određeno kao funkcija stupnja korozije, debljine zaštitnog sloja betona, veličine armature te određenih mehaničkih svojstava betona [13, 18]. Treba spomenuti i Tuttijev model iz 1982. Oba modela su bila važna za daljnji napredak istraživanja u ovom području te su bili temelj mnogobrojnim modelima nastalim godinama kasnije [16]. U tablici 1. analizirano je nekoliko suvremenih modela prodora klorida prema načinu proračuna, modeliranim procesima i parametrima prethodno opisanih u poglavlju 3.



Tablica 1. Pregled nekih suvremenih modela prodora klorida

MODEL	TRANSPORTNI PROCES	PROSTORNA DOMENA	KOEFIČIJENT DIFUZIJE	PROMIJENJIVOST RUBNIH UVJETA U VREMENU			VALIDACIJA (KALIBRACIJA ) MODELA	UTJECAJ KLIMATSKIH PROMJENA	UTJECAJ PUKOTINA	CIKLUS SUŠENJA I VLAŽENJA
				KONCENTRACIJA Klorida	TEMPERATURA	KONCENTRACIJA VODE/RH				
ClinConc (Tang, 1996) [21]	Difuzija, vezanje klorida	2D	Ovisan o temperaturi, vremenu, dubini betona	Da	Da	Ne	Nije poznato	Ne	Ne	Ne
Martin-Perez (1999) [22]	Difuzija, vezanje klorida, konvekcija	2D	Ovisan o temperaturi, relativnoj vlažnosti, stupnju hidratacije	Da	Da	Da	Na izmjerenim rezultatima iz literature	Ne	Ne	Ne
Life365 (2004) [23]	Difuzija	2D	Ovisan o vremenu, temperaturi	Ne	Ne	Ne	Na postojećim mostovima u morskome okolišu	Ne	Ne	Ne
Bastidas-Arteaga, Schoefs et al. (2014) [2]	Difuzija, konvekcija, vezanje klorida, difuzija vlažnosti, transport topline	1D	Ovisan o temperaturi, starenju betona, relativnoj vlažnosti, vezanju klorida	Da	Da	Da	Ne	Da	Ne	Ne
Khatami, Shafei (2017) [10]	Difuzija, konvekcija, vezanje klorida, difuzija vlažnosti, transport topline	2D	Ovisan o temperaturi, starenju betona, relativnoj vlažnosti, vezanju klorida	Da	Da	Da	Ne	Da	Ne	Ne

Tablica 1. Pregled nekih suvremenih modela prodora klorida - nastavak

MODEL	TRANSPORTNI PROCES	PROSTORNA DOMENA	KOEFIJICIENT DIFUZIJE	PROMIJENJIVOST RUBNIH UVJETA U VREMENU			VALIDACIJA (KALIBRACIJA ) MODELA	UTJECAJ KLIMATSKIH PROMJENA	UTJECAJ PUKOTINA	CIKLUS SUŠENJA I VLAŽENJA
				KONCENTRACIJA Klorida	TEMPERATURA	KONCENTRACIJA VODE/RH				
Nguyen, Bastidas-Arteaga (2017) [24]	Difuzija, vezanje klorida, konvekcija difuzija vlažnosti, termo-difuzija, kemijska aktiv-nost, distribucija topline	3D	Ovisan o temperaturi, relativnoj vlažnosti, starenju betona, koncentraciji slobodnih klorida	Ne	Da	Da	Nije poznato	Ne	Ne	Da
Xie, Wang et al. (2018) [7]	Difuzija	1D	Ovisan o starenju betona, temperaturi	Ne	Da	Ne	Nije poznato	Da	Ne	Ne
3D CHTM MODEL (Ožbolt, Kušter et al. 2020 ) [11]	Difuzija, vezanje klorida, konvekcija, proces sušenja i vlaženja, transport kapilarne vode, distribucija topline	3D	Ovisan o RH, temperaturi, pukotinama	Da	Ne	Da	Na uzorku i postojećim mostovima u morskom okolišu, na mostu izloženom solima za odleđivanje	Ne	Da	Da
Zachei, Bastidas-Arteaga (2022) [25]	Difuzija, konvekcija, vezanje klorida, distribucija topline	3D	Ovisan o v/c omjeru, vezanju klorida, temperaturi, relativnoj vlažnosti, pukotinama	Da	Da	Da	Ne	Ne	Da	Ne

U tablici 1. vidljiv je razvoj modela kroz godine, od jednostavnijih do vrlo kompleksnih modela prisutnih danas. Međutim, i među starijim modelima postoje razlike. Primjerice, Life365 [23] uključuje samo difuziju kao transportni proces klorida i konstantne rubne uvjete što ga čini poprilično jednostavnim modelom. Slično kao i ClinConc [21], iako ovaj model uz difuziju uključuje i vezanje klorida i pojedine varijable ovisne o vremenu. U usporedbi s ovim modelima, model Martin–Perez [22] je napredniji u smislu transportnih procesa klorida, uključuje i konvekciju, difuziju vlažnosti i transport topline. Modeli nastali prije 20 i više godina nisu uključivali utjecaj pukotina i ciklusa sušenja i vlaženja.

Posljednjih desetak godina razvijen je doista veliki broj modela prodora klorida u svrhu predviđanja uporabnog vijeka [2, 7, 11, 12, 24, 25]. Na tragu Martin – Perez modela [22] većina današnjih modela, pored difuzije obuhvaća i konvekciju, difuziju vlažnosti i distribuciju topline i moglo bi se reći da su ti procesi postali ustaljeni dio modeliranja transportnih procesa klorida. Poboljšanja numeričkih modela postignuto je i uključivanjem utjecaja vezanja klorida, jer samo slobodni kloridi uzrokuju depasivizaciju armature. Daljnje poboljšanje modela je svakako implementiranje procesa ciklusa sušenja i vlaženja. Prema 3D CHTM modelu [12] koji uključuje procese sušenja i vlaženja pokazalo se da isti mogu smanjiti vrijeme depasivizacije za čak 60 % u odnosu na modele koji ne uzimaju u obzir procese sušenja i vlaženja. Isti model [12], uključujući i utjecaj mehaničkog opterećenja tj. otvaranja pukotina u betonu pokazuje da pukotine višestruko ubrzavaju prodor klorida. Naime, koeficijent difuzije je od 10 do 100 puta veći u raspucanom u odnosu na neraspucani beton [12, 18]. Taj utjecaj pukotina je još uvijek zastupljen u poprilično malom broju modela, iako su pukotine na konstrukcijama gotovo uvijek prisutne.

Intenzivnije izmjene ciklusa sušenja i vlaženja su jedan od glavnih obilježja projekcija klimatskih promjena u budućnosti [6]. U svrhu istraživanja utjecaja klimatskih promjena na uporabni vijek konstrukcije razvijeni su modeli koji obuhvaćaju i taj utjecaj [2, 7, 10]. Uvjeti i rezultati ovih istraživanja detaljnije su opisani u poglavlju 3. Primjerice, [7] uključuje projekciju promjene temperature u budućnosti uz jednodimenzionalni transport klorida. Nadalje, [2] su za istraživanje razvili model koji uključuje utjecaje promjene temperature i relativne vlažnosti, ali također obuhvaća samo jednodimenzionalni transport klorida. Autori [10] su promatrali utjecaj klimatskih promjena na degradaciju armiranobetonskih mostova na području velikog snježnog opterećenja. Uz promjenu temperature i relativne vlažnosti ovaj model uključuje i povećanje površinske koncentracije klorida zbog povećanog korištenja soli za odleđivanje. Iako uključuju utjecaje klimatskih promjena niti jedan od ovih modela ne uključivanje ciklusa sušenja i vlaženja te utjecaj pukotina u betonu. Uz to, transportni procesi modela [7] obuhvaćaju samo proces difuzije što je znatno pojednostavljenje procesa prodora klorida u betonu. Treba napomenuti i da njihovi rezultati nisu kalibrirani niti na uzorcima niti na postojećim konstrukcijama. Primjetno je da, iako postoji veliki napredak u modeliranju u usporedbi sa starijim mode-

lima, još je prostora za napredak. Naime, razvijeni su modeli koji uključuju utjecaj pukotina, varijable promjenjive u vremenu, cikluse sušenja i vlaženja, a i pojedine utjecaje klimatskih promjena. Međutim, nije dovoljno postignuto u pogledu uspješnog objedinjavanja svih tih procesa i njihove interakcije.

Općenito, prema važećim normama u RH [26, 27] pri projektiranju građevinskih konstrukcija u sklopu dokaza pouzdanosti konstrukcije obavezno je projektiranje sigurnosti, uporabljivosti i trajnosti konstrukcije. Međutim, proračun trajnosti obuhvaća tek implicitni (opisni) postupak koji rezultira određenim zahtjevima na projektiranje, izvođenje i održavanje konstrukcije. Određivanjem razreda izloženosti konstrukcije uz uzimanje u obzir dodatnih mjera zaštite ili posebnih postupaka izvedbe, ako isti postoje, dobiju se zahtijevane vrijednosti vodocementnog omjera, minimalnog zaštitnog sloja, način i raspored pregleda konstrukcije, radovi održavanja i dr. Te veličine ponajprije proizlaze iz iskustva iz prakse te rezultata ispitivanja. Ispunjavanjem ovih zahtjeva trajnost konstrukcije se smatra zadovoljenom. Za projektiranje trajnosti u skladu sa principima pouzdanosti ipak je primjerenije tzv. eksplicitno projektiranje. Norma HRN EN 206 [20] navodi tek pojedine slučajeve kada bi eksplicitno projektiranje moglo biti adekvatno, npr. koriste se novi materijali ili planira izgradnja velikog broja sličnih konstrukcija, ako je zahtjevni uporabni vijek znatno različit od 50 godina, ako se radi o posebno agresivnim ili dobro definiranim djelovanjima okoliša, za specijalne konstrukcije koje zahtijevaju znatno manju vjerojatnost otkazivanja i dr. Primjer inženjerskih konstrukcija velike važnosti koje imaju zahtijevani uporabni vijek veći od 50 godina, a uz to su izložene izrazito agresivnom okolišu su mostovi. Zbog toga je eksplicitno projektiranje trajnosti mostova od posebnog značaja. Rezultat eksplicitnog projektiranja trajnosti je vjerojatnost otkazivanja ili indeks pouzdanosti konstrukcije, a proračun trajnosti obuhvaća modele svih relevantnih mehanizama degradacije kalibrirani na uvjetima u eksploataciji [28]. Dakle, nužno za adekvatno eksplicitno projektiranje trajnosti je postojanje odgovarajućih i sveobuhvatnih modela degradacije. Uz rezultate istraživanja utjecaja klimatskih promjena i analizu modela prodora klorida danih u poglavljima 3. i 4. zaključuje se da je u cilju ispravnog predviđanja uporabnog vijeka potreban daljnji razvoj modeliranja uz implementaciju utjecaja klimatskih promjena. Zanimajući njihov utjecaj, vjerojatno je da je predviđeni uporabni vijek zamjetno precijenjen. Još uvijek ne postoji model koji bi uz relevantne transportne procese, uključivao i cikluse sušenja i vlaženja, utjecaj pukotina i klimatskih promjena. Također, potrebna je kalibracija modela na podacima izmjenjenim na stvarnim građevinama kako bi se utvrdila relevantnost njihovih rezultata i mogućnosti napretka i/ili korištenja. Takvi sveobuhvatni modeli mehanizama degradacije daju preciznije zahtjeve za projektiranje i izvedbu konstrukcija te za unapređenje postupka održavanja što bi rezultiralo pouzdanijim konstrukcijama, kao i smanjenjem troškova tijekom životnog vijeka konstrukcije.

## 5 Zaključak

Dokaz pouzdanosti konstrukcije danas je još uvijek ponajviše fokusiran na zahtjeve nosivosti i uporabljivosti. Trajnost konstrukcije se smatra zadovoljenom ispunjavanjem određenih zahtjeva na projektiranje, izvođenje i održavanje zasnovanih na iskustvenim veličinama iz prakse. Međutim, svjedoci smo da mnoge postojeće konstrukcije već u ranim fazama svog uporabnog vijeka zahtijevaju veće sanacije i popravke. Eksplicitno projektiranje, uz precizne i pouzdane modele degradacije konstrukcija omogućuje predviđanje budućih uvjeta tijekom uporabnog vijeka konstrukcije. Tada bi pravovremeno i adekvatno reagiranje spriječilo potrebu za većim i skupljim sanacijama, a u konačnici omogućilo ostvarenje zahtijevanog uporabnog vijeka. Bitna značajka konstrukcijskih uvjeta u budućnosti su klimatske promjene, sa velikim utjecajem na proces prodora klorida, a time i na sigurnost i stabilnost konstrukcije. Stoga je za ispravno gospodarenje građevinama nužno utjecaj klimatskih promjena uključiti u modele za predviđanje uporabnog vijeka konstrukcije. Od prvih postavljenih modela postignut je napredak u modeliranju procesa korozije, ali potrebno su daljnja poboljšanja. Posebice u pogledu razvoja sveobuhvatnog modela koji bi uz ostale bitne procese uključivao i cikluse sušenja i vlaženja, utjecaj pukotina u betonu te utjecaj promjenjivih klimatskih parametara te njegova kalibracija na izmjerenim podacima postojećih konstrukcija.

## Literatura

- [1] Milić, I., Ivanković, A.M., Syrkov, A., Skokandić, D.: Bridge failures, forensic structural engineering and recommendations for design of robust structures, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 7, pp. 717-736, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3234.2021>
- [2] Bastidas-Arteaga, E., Schoefs, F., Stewart, M.G., Wang, X., Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach, *Engineering Structures* 51 [2014] pp. 259-266, DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.01.006
- [3] Francišković, J.: Corrosion protection in reinforced-concrete structures, *GRAĐEVINAR*, 56 (2004) 12
- [4] Cairns, J., Plizzari, G.A., Du, Y., Law, D.W.; Franzoni, C., Mechanical Properties of Corrosion-Damaged Reinforcement, *ACI Materials Journal*, 102 (4), pp. 256-264, 2005
- [5] Grandić, Davor; Bjegović, Dubravka; Sorić, Zorislav Proračunski dijagram naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu, *GRAĐEVINAR*, 61 (2009), 2, pp. 157-167
- [6] Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. et al., 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- [7] Xie, HB., Wang, YF., Gong, J. et al. Effect of Global Warming on Chloride Ion Erosion Risks for Offshore RC Bridges in China, *KSCE Journal of Civil Engineering* 22 (2018) 9, pp.3600–3606 doi: 10.1007/s12205-018-1547-8
- [8] Bastidas-Arteaga E, Chateaneuf A, Sánchez-Silva M. et al., Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: a stochastic approach, *Structural Safety* 32 (2010), pp.238-249, doi: 10.1016/j.strusafe.2010.03.002
- [9] Gao X., Wang X., Impacts of Global Warming and Sea Level Rise on Service Life of Chloride-Exposed Concrete Structures, *Sustainability*, 9 (2017) 3, pp. 460; doi:10.3390/su9030460
- [10] Khatami, D., Shafei, B., Impact of climate conditions on deteriorating reinforced concrete bridges in the US Midwest region, *J. Perform. Constr. Facil.*, 35 (2021) 1. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001528
- [11] Kušter Marić M, Ožbolt J, Balabanić G, et al., Chloride Transport in Cracked Concrete Subjected to Wetting – Drying Cycles: Numerical Simulations and Measurements on Bridges Exposed to DE-Icing Salts. *Front. Built Environ.* 6 (2020), doi: 10.3389/fbuil.2020.561897
- [12] Sousa M.L., Dimova S., Athanasopoulou A et al., Expected implications of climate change on the corrosion of structures, EUR 30303 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, doi:10.2760/05229, JRC121312
- [13] Bažant Z.P., Physical model for steel corrosion in concrete sea structures – Theory, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 105 (ST6), pp. 1137-1153
- [14] Nilsson L.O., Concepts in chloride ingress modelling, Third RILEM workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete 9-10 September 2002, Madrid, Spain,
- [15] Koenders E., Imamoto K., Soive A. (2022) Benchmarking Chloride Ingress Models on Real-life Case Studies—Marine Submerged and Road Sprayed Concrete Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 270-CIM, Springer International Publishing
- [16] Proračun uporabnog vijeka konstrukcija (poglavlje), *Betonske konstrukcije 4*. Sanacije, Radić J. i suradnici, Hrvatska Sveučilišna naklada, Zagreb, 165-226, 2010
- [17] Zandi Hanjari, K., Structural Behaviour of Deteriorated Concrete Structures. PhD thesis. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology – Department of Civil and Environmental Engineering – Division of Structural Engineering, Concrete Structures, 2010
- [18] Kušter Marić M., Predviđanje uporabnog vijeka armiranobetonskih mostova izloženih kloridima, Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013
- [19] Salta, M. M. & Pereira, E. (2002) Factors influencing the corrosion in the reinforced concrete - State of the art. Report N 2-3: Concrete in marine environment, Lisbon: Medachs – Interreg IIIB Atlantic Space – Projekt N 197.

- [20] HRN EN 206-1:2021 Beton -- Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A2:2021), Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2021
- [21] Nilsson L.O., Sandberg P., Poulsen E. et al., HATEK, A system for estimation of chloride ingress into concrete, Theoretical background, Road directorate, Ministry of transport, Denmark, 1997
- [22] Martín – Pérez, B. (1999) Service life modelling of RC highway structures exposed to chlorides. PhD thesis. Toronto: University of Toronto.
- [23] Bentz E. C., Thomas M. D. A., Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, December 23, 2020
- [24] Nguyen, P. T., Bastidas-Arteaga, E., Amiri, O. et al., An Efficient Chloride Ingress Model for Long-Term Lifetime Assessment of Reinforced Concrete Structures Under Realistic Climate and Exposure Conditions, International Journal of Concrete Structures and Materials 11 (2017), pp. 199-213, DOI: 10.1007/s40069-017-0185-8
- [25] Zacchei, E.; Bastidas-Arteaga, E. Multifactorial Chloride Ingress Model for Reinforced Concrete Structures Subjected to Unsaturated Conditions. Buildings 12 (2022) 107. <https://doi.org/10.3390/buildings12020107>
- [26] HRN EN 1990:2011 Eurokod – Osnove projektiranja konstrukcija (EN 1990:2002+A12005/AC:2010)
- [27] HRN EN 1992-1-1:2013 Eurokod – Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2010) Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2013
- [28] Radić, J., Bleiziffer, J., Kalafatić, I.: Novi pristup osiguranju trajnosti konstrukcija, GRAĐEVINAR, 62 (2010) 11, pp. 971-980

# Primjena računalnih modela za analizu i smanjenje toplinskih mostova u građevinama

**Domagoj Tkalčić<sup>1</sup>**, izv. prof. dr. sc. **Bojan Milovanović<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, domagoj.tkalcic@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, bojan.milovanovic@grad.unizg.hr

## Sažetak

Zahtjevi za kvalitetnom gradnjom iziskuju građevinu bez toplinskih mostova. Kako bi se smanjio i po mogućnosti eliminirao njihov utjecaj na ukupnu potrošnju energije zgrade, još u fazi projektiranja je potrebno obratiti pažnju na njih. Pri računanju toplinskih mostova pomoću računalnog programa, dolazi do brojnih modifikacija elemenata kako bi proračun bio izvediv s dovoljnom točnošću u razumnom vremenu. U ovom radu analiziraju se modeli na kojima će se vršiti proračun, te će se usporediti rezultati tri detalja za koje su izračunate vrijednosti linijskog toplinskog mosta.

*Ključne riječi: toplinski most, nZEB, toplinska provodljivost, metoda kontrolnih volumena, CRORAL*

## Application of computer models for the analysis and reduction of thermal bridges

### Abstract

Requirements for quality construction demand buildings without thermal bridges. In order to reduce and if possible, eliminate their impact on the overall energy consumption of a building, it is necessary to pay close attention to them in the design phase. When calculating thermal bridges using computer software, there are numerous modifications of the elements in order to make the calculation feasible with sufficient accuracy in a reasonable time. For the purposes of this paper, the models on which the calculation will be performed are analysed, and the results of three details for which the values of the linear thermal bridge were calculated will be compared.

*Key words: Thermal bridge, nZEB, thermal conductivity, control volume method, CRORAL*



## 1 Uvod

Napretkom građevinskih materijala i tehnologijom izvođenja građevinskih radova povećala se kvaliteta građevina i smanjila se energija potrebna za grijanje i hlađenje građevine. Dodatni zahtjevi za smanjenjem potrošnje energije postavljeni su tehničkim propisom prema kojem sve zgrade izgrađene nakon 31.12.2019. moraju biti nZEB (engl. Nearly Zero Energy Building), odnosno, zgrade gotovo nulte energije [1]. Prema tehničkom propisu „Zgrada gotovo nulte energije je zgrada koja im vrlo visoka energetska svojstva. Ta gotovo nulta odnosno vrlo niska količina energije trebala bi se u vrlo značajnoj mjeri pokrivati energijom iz obnovljivih izvora, uključujući energiju iz obnovljivih izvora koja se proizvodi na zgradi ili u njezinoj blizini, a za koju su zahtjevi utvrđeni ovim propisom“ [1]. Kako bi se smanjila potrebna energija za grijanje i hlađenje zgrade, nije dovoljno samo postaviti toplinsku izolaciju na svaki element zgrade. Potrebno je posebnu pažnju posvetiti rješavanju toplinskih mostova, ne samo zbog potrošnje energije, nego i zbog povećane lokalne opasnosti od kondenzacije vodene pare koja može uzrokovati razvoj plijesni i gljivica, te naposljetku i građevinsku štetu [2].

Zbog relativno velikog udjela gubitaka topline kroz toplinske mostove u odnosu na gubitke kroz zidove, gubici topline kroz toplinske mostove puno su veći nego u slučaju slabije izoliranih zgrada. Njihov utjecaj može iznositi i do 30 % u odnosu na transmisijske gubitke [3]. Zato je još u fazi projektiranja zgrade važno uzeti u obzir njihov utjecaj i smanjiti doprinos potrošnji energije. Utjecaj toplinskih mostova može se uzeti prema katalogu toplinskih mostova, prema normi HRN EN ISO 14683 [4] ili proračunom. Ako se uzmu vrijednosti prema katalogu ili spomenutoj normi, podrazumijeva se da te vrijednosti imaju manju točnost od vrijednosti dobivene proračunom zbog nemogućnosti prilagodbe kataloga i norme stvarnim detaljima, odnosno, nedostatka mogućnosti odabira materijala, debljine elemenata i stvarne geometrije. U tim slučajevima moguće je uzeti u proračun puno veći utjecaj toplinskih mostova od izračunatog i stvarnog utjecaja, zbog čega projekt možda neće zadovoljiti nZEB zahtjeve, te će se zbog toga nepotrebno povećavati debljina toplinske izolacije. Korištenjem računalnih alata za numeričke simulacije modela omogućuje se precizna analiza toplinskih mostova u različitim uvjetima, kao i identifikacija i kvantifikacija toplinskih mostova u konstrukciji te njihovo uspoređivanje s različitim varijantama slojeva i materijalima. U radovima [2, 5, 6] istražene su mogućnosti LSF (engl. Light Steel Frame) panela gdje su napravljene numeričke analize LSF panela s različitim položajem mineralne vune kao toplinske izolacije i utjecajem razmaka čeličnih nosača na toplinsku vodljivost panela. Unatoč širokoj primjeni LSF panela u građevinarstvu, istraživanja o LSF panelima s PUR pjenom kao toplinskom izolacijom su vrlo ograničena. Stoga je potrebno provesti daljnja istraživanja u ovom području kako bi se bolje razumjela učinkovitost LSF panela s PUR pjenom kao toplinskom

izolacijom. Računalni modeli omogućuju bržu i precizniju analizu, što je važno pri proračunu složenih detalja spojeva elemenata. Računalni alati za numeričke simulacije omogućuju analizu toplinskih mostova u dinamičkim uvjetima, čime se omogućuje kontroliranje ponašanja konstrukcije tijekom cijele godine, uključujući različite uvjete okoline i unutarnje uvjete zgrade. Konačan cilj razvoja računalnih modela za analizu toplinskih mostova je postizanje energetski učinkovitijih zgrada, a dodatna prednost u fazi projektiranja je prevencija stvaranja toplinskih mostova. Za već izrađene zgrade, odnosno već izvedene toplinske mostove moguće je napraviti model prema kojem će se u budućnosti napraviti model sanacije. U ovom radu prikazuje se analiza smanjenja utjecaja toplinskih mostova u građevinama korištenjem računalnim modela na, gdje će se isto prikazati na primjerima. Rezultati će biti prikazani za tri varijante izvedbe detalja, a varirani parametri detalja su vezani uz toplinsku izolaciju, odnosno, varira se debljina i položaj toplinske izolacije na elementima i njihovim spojevima.

Norma HRN EN ISO 10211 [7] definira toplinski most kao manje područje u omotaču grijanog dijela zgrade kroz koje je toplinski tok povećan zbog promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela. Spojevi elemenata najčešće imaju manji toplinski otpor od samih elemenata koji se spajaju zbog promjene svojstava materijala ili geometrije spoja zbog čega se na ostvarenom spoju pojavljuje povećani toplinski tok odnosno dolazi do diskontinuiteta u unutarnjoj i vanjskoj površinskoj temperaturi.

## 2 Računalni modeli

Postoje brojni računalni alati za proračun linijskih toplinskih mostova (2D) koji računaju sukladno aktualnim normama ISO 10211 [7], ISO 10077-1 [8] i ISO 10077-2 [9], kao što su AnTherm, Flixo, CRORAL, itd. Za potrebe ovog rada odabran je CRORAL [10].

Norme HRN EN ISO 10211 [7] i HRN EN ISO 14683 [4] ulaze u proračun s pretpostavkom uspostavljenog stacionarnog toplinskog toka između dva različita okoliša. Za izradu računalnog modela potrebno je prilagoditi elemente i detalj spoja građevnih elemenata za koji se želi izračunati utjecaj toplinskog mosta. Konkretno za primjeru CRORAL-a, detalj se modificira na način da se aproksimira pravokutnicima zbog praktičnosti u crtanju, numeričkom računanju i analizi. Pravokutni elementi su jednostavni za opisivanje geometrije i matematičkog ponašanja, a također su lako povezivi u mrežne strukture. Pravokutni elementi mogu se kombinirati na različite načine kako bi se stvorili složeniji oblici koji se mogu koristiti za modeliranje stvarnih konstrukcija ili materijala. Sukladno aproksimaciji pravokutnicima, CRORAL pri proračunu toplinskog toka, odnosno temperatura, koristi metodu kontrolnih volumena pri kojoj svaki element ima svoj skup čvorova, koji predstavljaju kritične točke u ele-

mentu. Čvorovi čine sektore koji se mogu analizirati. Postavljaju se na mjesta gdje se susreću dva ili više različita materijala ili gdje su rubni uvjeti poput temperature poznati.

Temperatura vanjskog okoliša odabrana je prosječnom hladnom zimskom danu u kontinentalnoj Hrvatskoj. Uvjeti unutarnjeg okoliša (grijanog) definirani su temperaturom zraka od 20 °C, dok su uvjeti vanjskog okoliša definirani temperaturom od -10 °C. Iznosi plošnih koeficijenata prijelaza topline potrebnih za numerički proračun uzeti su iz norme HRN EN ISO 6946 [11]. Pri izradi modela prozora, korištena je pojednostavljena metoda, prema kojoj se napravi model bloka stvarne širine okvira prozora, a  $U$  vrijednost se izračuna pomoću toplinskog otpora prozora [12].

**Tablica 1. Svojstva građevnih elementa**

Građevni element	Sloj	Debljina [cm]	$\lambda$ [W/(mK)]
Panel	Mineralna vuna	3	0,038
		5	
		8	
		13,5	
	Gips-kartonska ploča	1,25	0,38
<b>Dodatno</b>	<b>Opis</b>		-
Nosiva konstrukcija	Čelični nosači		50
-	-		<b><math>U_w</math> [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>
Prozor	Okvir + staklo		1,411

### 3 Proračun linijskog toplinskog mosta

Proračun linijskog toplinskog mosta računa se prema normi HRN EN ISO 2011 [7], u kojoj se koeficijent prolaska topline kroz cijeli panel označava efektivnom  $U$  – vrijednosti ( $U_{eff}$ ), a računa se pomoću koeficijenta  $L_{2D}$ , čije fizikalno značenje predstavlja ukupni prolazak topline kroz model. Ako se podijeli s duljinom geometrijskog modela, dobije se  $U_{eff}$  prema izrazu (1), pri čemu se  $L_{2D}$  računa prema izrazu (2) [7]:

$$U_{eff} = \frac{L_{2D}}{l} \quad (1)$$

$$L_{2D} = \frac{\Phi}{(T_i - T_e)} \quad (2)$$

Gdje je:

$L_{2D}$  – koeficijent toplinske veze dobiven pomoću 2D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša [W/(mK)]

- $l$  – duljina geometrijskog modela [m]  
 $\Phi$  – 2D toplinski tok [W/m]  
 $T_i$  – unutarnja temperatura okoliša [°C]  
 $T_e$  – vanjska temperatura okoliša [°C]

Linijski toplinski most, definira se kao povećanje stacionarnog toplinskog toka kroz ravnomjerni presjek duž jedne od tri okomite osi u odnosu na neporemećeno područje. U građevinskoj fizici se označuje kao  $\psi$  – vrijednost, odnosno koeficijent linijskog toplinskog mosta, a računa se prema izrazu (3) [7]:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{i=1}^n U_i \cdot l_i \quad (3)$$

Pri čemu je:

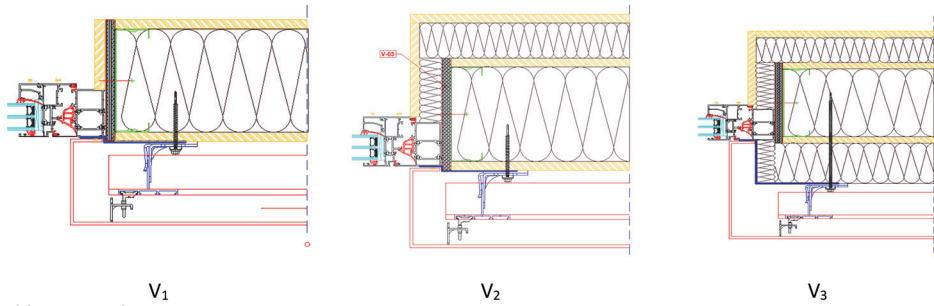
- $U_i$  – plošni koeficijent prolaska topline 1D komponente  $i$  koja razdvaja dva promatranja okoliša [W/(mK)]  
 $l_i$  – duljina na koju se odnosi vrijednost [m]  
 $N$  – broj 1D komponenti

Izrađeni su detalji spoja panela i prozora (slika 1) za koje će se u nastavku prikazati rezultati raspodijele temperature po presjeku (slika 2), usporedbu površinskih temperatura spoja panela s prozorom i površinskih temperatura na mjestu čeličnih nosača (slika 3), te usporedba  $U$  – vrijednosti detalja sa – vrijednosti (slika 4).

Detalj  $V_1$  prikazuje osnovnu verziju spoja panela i prozora. Panel se sastoji od nosive čelične konstrukcije koja je zatvorena s gips-vlaknastom pločom s unutarnje i vanjske strane, a unutar samog panela postavljena je mineralna vuna čija je uloga zvučna i toplinska izolacija prostora koji će se zatvoriti panelom. S vanjske strane panela nalazi se ventilirana fasada.

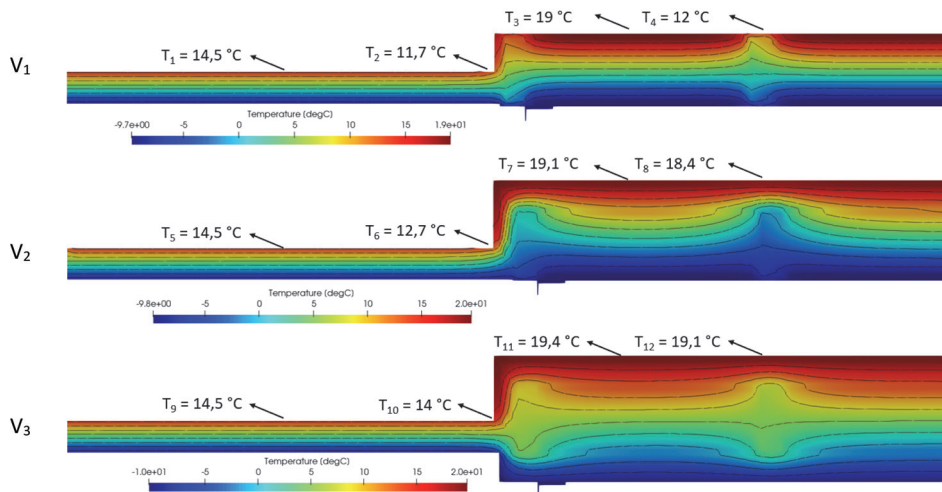
Detalj  $V_2$  prikazuje osnovnu verziju spoja panela i prozora na koju je s unutarnje strane dodan panela dodan sloj mineralne vune u debljini od 5 cm, a proteže se sve do okvira prozora gdje njezina debljina iznosi 3 cm. Mineralna vuna zatvara se dodatnom gips-vlaknastom pločom iz praktičnih i estetskih razloga. Dodatan sloj zamišljen je kao sloj u koji će se ugraditi instalacije kako se ne bi stvarali dodatni toplinski mostovi prilikom rezanja tzv. šliceva za instalacije i cijevi sanitarija. Budući da je dodatan sloj od mineralne vune koja ima odlična toplinsko izolacijska svojstva, smanjuje se toplinska provodljivost cijelog panela, ali zbog izolacije okvira prozora, očekuje se i smanjenje utjecaja toplinskih mostova na spoju panela i prozora.

Detalj  $V_3$  prikazuje dodatno izoliran spoj  $V_2$  na koji je s vanjske strane dodan sloj mineralne vune kako bi se još dodatno povećala - vrijednost zida i izolacija okvira prozora s vanjske strane zbog smanjenja utjecaja linijskog toplinskog mosta. Slika 1 prikazuje detalje  $V_1$ ,  $V_2$  i  $V_3$ .



Slika 1. Detalji

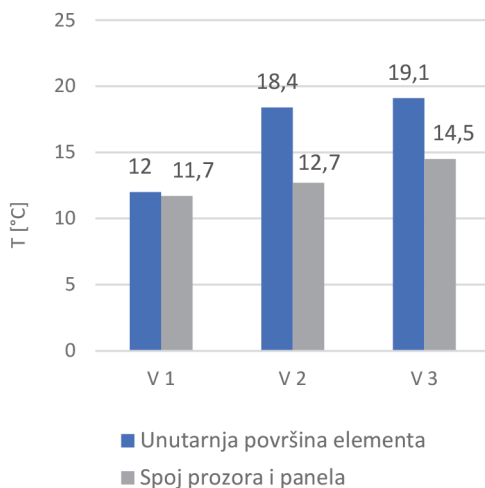
Nakon izrade modela i proračuna u CRORAL-u, dobije se prikaz raspodjela temperature po presjeku elemenata (slika 2).



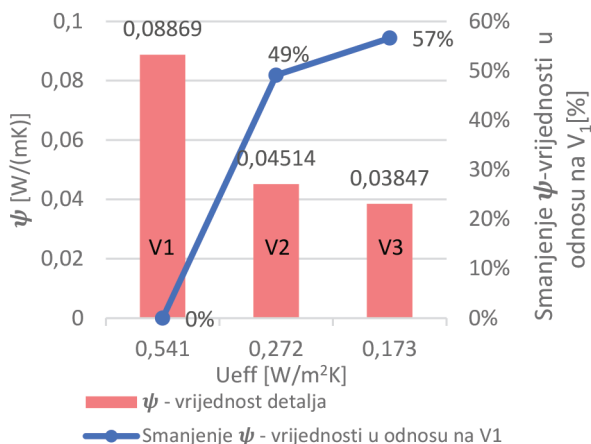
Slika 2. Raspodjela temperature po presjeku

Na detalju V<sub>1</sub> (slika 2) vidi se deformacija toplinskog toka na mjestu nosača i mjestu ugradnje prozora i zida s prozorom. Temperatura površine prozora s grijane strane iznosi  $T_1 = 14,5$  °C, dok na samom spoju prozora i panela iznosi  $T_2 = 11,7$  °C. Površinska temperatura zida s unutarnje strane prostorije na mjestima gdje panel nema čeličnih nosača iznosi  $T_3 = 19$  °C, dok je na mjestima gdje postoje čelični nosači temperatura snižena za čak 7 °C. Usporede li se površinske temperature u slučaju V<sub>1</sub> i V<sub>2</sub> (slika 2) na mjestima s čeličnim nosačima ( $T_4$  i  $T_8$ ) tada se jasno vidi pozitivan utjecaj dodatne toplinske izolacije. Također, razlika u temperaturi se pojavljuje i na spoju prozora i panela, gdje je razlika 1 °C. Slika 2 V<sub>3</sub> pokazuje najbolje rezultate. Na po-

vršini s grijane strane, nema izraženih toplinskih mostova, razlika u temperaturama  $T_{11}$  i  $T_{12}$  iznosi svega  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Razlika između temperatura na površini stakla i površine spoja panela i prozora ( $T_9$  i  $T_{10}$ ) iznosi  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ako se usporede varijante  $V_2$  i  $V_3$ ,  $V_3$  ima višu temperaturu spoja prozora s panelom za  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Grafički prikaz usporedbe površinskih temperatura prikazuje slika 3.



Slika 3. Usporedba površinskih temperatura



Slika 4. Usporedba iznosa vrijednosti linijskih toplinskih mostova

Površinske temperature su u direktnoj korelaciji s  $\psi$  - vrijednosti. Crveni stupci prikazuju vrijednosti za svaku verziju panela (slika 4), te je za svaki izračunata efektivna

U - vrijednost. Ako se uspoređuju samo iznosi linijskog toplinskog mosta ( $\psi$  – vrijednosti), varijanta  $V_1$  ima daleko najlošija svojstva. Varijanta  $V_2$  ima toplinski izoliran unutarnji okvir prozora i unutarnju stranu panela zbog kojeg je smanjen toplinski tok, što rezultira 49 % manjom  $\psi$  – vrijednosti. U slučaju  $V_3$  gdje je mineralnom vunom debljine 8 cm vanjska toplinska izolacija smanjila – vrijednost za 8 % u usporedbi s varijantom  $V_2$ , a ukupno je - vrijednost smanjena za 57 % što će na prozoru dimenzija 1,23 x 1,48 m dati efektivne vrijednosti koeficijenta prolaska toplinske prozora  $U_{w,eff1} = 1,89 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $U_{w,eff2} = 1,67 \text{ W/m}^2\text{K}$  i  $U_{w,eff3} = 1,62 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Pri čemu je  $U_{w,eff}$  izračunat prema izrazu (3) [9]:

$$U_{w,eff} = U_w + \psi \cdot O \quad (4)$$

gdje je:

$O$  – opseg prozora [m]

## 4 Zaključak

Primjenom matematičkih metoda kao što su metoda kontrolnih volumena postalo je moguće na relativno jednostavan i brz način izračunati toplinska svojstva elemenata, spojeva, utjecaj toplinskih mostova i raspodjelu temperatura po presjeku elemenata. Proračunom toplinskih mostova uzima se u obzir debljina slojeva, karakteristike materijala i točna geometrija, za razliku od vrijednosti uzetih iz kataloga toplinskih mostova ili norme. Točno izračunatim  $\psi$  - vrijednostima značajno se doprinosi u točnosti računanja ukupne potrošnje energije u zgradama. U radu je ilustrativno prikazano djelovanje toplinskih mostova na karakterističnim pozicijama. Uspoređene su tri varijante izvedbe detalja spoja panela i prozora. Svaka varijanta ima drugačiji položaj i debljinu toplinske izolacije kako bi se direktno pokazao utjecaj na površinsku temperaturu elemenata i - vrijednost. Oba prikaza jasno objašnjavaju značaj toplinskih mostova na povećanje toplinskih gubitaka i rizik od nastajanja građevinske štete. Opisi različitih izvedba konstrukcija uključuju i komentar na očekivani utjecaj na stvaranje toplinskog mosta. Detalj  $V_1$  nema toplinske izolacije okvira prozora i čeličnih nosača, što rezultira daleko najlošijim toplinskim svojstvima. Na detalju  $V_2$  vidljivo je poboljšanje od 49 % u smanjenju prijenosa topline kroz toplinski most u odnosu na detalj  $V_1$ . Detalj  $V_3$  ima najbolja toplinska svojstva, gdje je – vrijednost smanjena za čak 57 %. Računalnim modelima omogućuje se usporedba različitih rješenja i odabir optimalnog za smanjenje utjecaja toplinskih mostova na potrošnju ukupne energije zgrade.

## Literatura

- [1] Ministarstvo prostornog uređenja graditeljstva i državne imovine, *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*. Croatia: Narodne novine, 2020.
- [2] B. Milovanović, M. Bagarić, M. Gaši, N. Vezilić Strmo, "Case Study in Modular Lightweight Steel Frame Construction: Thermal Bridges and Energy Performance Assessment," *Applied Sciences (Switzerland)*, 12, br. 20, 2022.
- [3] H. Altany, K. Y. Kim, "Non Repeating Thermal Bridges and the Impact on Overall Heating Energy Consumption in a Typical UK Home," 2014.
- [4] Hrvatski zavod za norme, "HRN EN ISO 14683; Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values." Hrvatski zavod za norme, 2017.
- [5] E. Roque, P. Santos, "The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to its position," *Buildings*, 7, br. 1, 2017.
- [6] E. De Angelis, E. Serra, "Light steel-frame walls: Thermal insulation performances and thermal bridges," *Energy Procedia*, 45, pp. 362–371, 2014.
- [7] Hrvatski zavod za norme, "HRN EN ISO 10211; Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations." Hrvatski zavod za norme, 2017.
- [8] Hrvatski zavod za norme, "HRN EN ISO 10077-1; Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General ISO 10077-1:2017." Hrvatski zavod za norme, 2017.
- [9] Hrvatski zavod za norme, "HRN EN ISO 10077-2; Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames." Hrvatski zavod za norme, 2017.
- [10] M. Gaši, "CRORAL-Computer Program for Thermal Bridge Analysis and Vapour Analysis." 2023.
- [11] Hrvatski zavod za norme, "HRN EN ISO 6946; Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods." 2017.
- [12] K. Schild, *Wärmebrücken-Berechnung und Mindestwärmeschutz*. Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.





# Primjena FRP armature kod armiranja montažnih fasadnih sendvič panela

Tomislav Vugrinec<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Tomislav Kišiček<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PRO-ARTING j.d.o.o., tvugrinec@student.grad.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, tomislav.kisicek@grad.unizg.hr

## Sažetak

Beton armiran čeličnom armaturom danas predstavlja najzastupljeniji način gradnje građevinskih konstrukcija. Glavne mane armiranobetonskih konstrukcija su velika vlastita težina i korozija armature pogotovo ako se konstrukcija nalazi u agresivnoj okolini. Zbog toga se mnogi znanstvenici u svijetu bave istraživanjem nemetalnih materijala kao što je FRP (Fiber Reinforced Polymer) za armiranje betonskih konstrukcija. Ovaj materijal je otporan na koroziju i njegovom upotrebom znatno se povećava trajnost konstrukcija i smanjuje vlastita težina nosivih elemenata. U ovom radu istražena je primjena FRP armature za armiranje montažnih fasadnih sendvič panela. Na temelju različitih istraživanja koja su provedena vezana uz primjenu FRP armature kod armiranja betonskih elemenata u radu su opisane osnovne karakteristike FRP armature i prikazane su osnove proračuna elemenata napreznih na savijanje koje se mogu primijeniti za dimenzioniranje sendvič panela. Također, dan je osvrt na dosadašnja ispitivanja provedena na temu FRP armature kod sendvič panela i drugih elemenata, kao i na danja istraživanja koja je potrebno provesti kako bi došlo do primjene FRP armature za armiranje montažnih fasadnih sendvič panela u svakodnevnoj praksi.

*Ključne riječi: trajnost konstrukcija, FRP armatura, montažni sendvič paneli, nosivost na savijanje*

## Application of FRP reinforcement in reinforcing prefabricated facade sandwich panels

### Abstract

Reinforced concrete with steel reinforcement is currently the most common way of building civil engineering structures. The main disadvantages of reinforced concrete structures are their own heavy weight and corrosion of reinforcement, especially if the structure is located in an aggressive environment. That is why many scientists in the world are researching non-metallic materials such as FRP for reinforcing concrete structures. This material is resistant to corrosion and its use significantly increases the durability of structures and reduces the self-weight of load-bearing elements. In this paper, the application of FRP reinforcement for reinforcing prefabricated facade sandwich panels has been discussed. Based on different researches that have been conducted related to the application of FRP reinforcement in reinforcing concrete elements, the paper describes the basic characteristics of FRP reinforcement and shows the basics of calculation of elements stressed by bending that can be applied for dimensioning sandwich panels. Also, an overview is given on previous tests carried out on the topic of FRP reinforcement in sandwich panels and other elements, as well as on current research that needs to be carried out in order to come to the application of FRP reinforcement for reinforcing prefabricated facade sandwich panels in everyday practice.

*Key words: durability of structures, FRP reinforcement, prefabricated sandwich panels, bending capacity*

## 1 Uvod

Posljednjih godina veliki broj istraživanja usmjeren je na „korištenje kompozitnih materijala, tj. proizvoda od polimera armiranog vlaknima – FRP (eng. *Fiber Reinforced Polymer*) kod pojačanja postojećih ili armiranja novih betonskih i zidanih konstrukcija“. FRP je načinjen od finih neprekinutih vlakana povezanih polimernom smolom. Vlakna mogu biti staklena, ugljična i aramidna pa se rade proizvodi od GFRP-a (staklena vlakna), CFRP-a (ugljična vlakna) i AFRP-a (aramidna vlakna) [1]. Moguće je koristiti i bazaltna vlakna (BFRP) ili kombinaciju više vrsti vlakana. Za povezivanje rabi se epoksidna smola, rjeđe poliester ili vinilester.

Kod proizvodnje elemenata od FRP-a primjenjuje se tehnologija izvlačenja uz kapuljenje ili prešanje (poltrusion process). Za armiranje novih betonskih konstrukcija proizvode se žice i šipke okruglog ili pravokutnog presjeka te kabeli za prednapinjanje betonskih konstrukcija. Za pojačanje i obnovu postojećih zidanih zidova ili armiranobetonskih konstrukcija primjenjuju se lamele od FRP-a te trake ili tkanine od vlakana nosive u jednom ili više smjerova. Nositelji čvrstoće proizvoda od FRP-a su vlakna, dok je uloga polimera (matrice) povezivanje vlakna, prijenos vlačnih naprezanja podjednako na sva vlakna te da štiti vlakna od štetnog okoliša i mehaničkih oštećenja [2].

Ovaj materijal ima čitav niz dobrih karakteristika kao što su: visoka vlačna čvrstoća, dobro ponašanje pod dinamičkim djelovanjem (ima oko 70 % vrijednosti početne vlačne čvrstoće nakon dva milijuna ciklusa opterećenja [3]), otpornost na koroziju, otpornost na vlagu, te niska zapreminska težina. Nije osjetljiv na magnetizam i ne provodi električnu struju [4, 5]. Primjena FRP armature za armiranje novih betonskih konstrukcija zahtijeva teorijsku podlogu za proračun takvih konstrukcija. Zadnjih godina, brojni istraživači bave se eksperimentalnim i teorijskim opisom ponašanja betonskih elemenata armiranih s FRP armaturom, te u sklopu tih istraživanja daju prijedloge proračuna. Izvedeni su brojni eksperimenti, a izvedene su i prve konstrukcije. Proračuni takvih konstrukcija se temelje na modificiranim postojećim izrazima za armiranobetonske konstrukcije s čeličnom armaturom [6]. Danas u svijetu postoji čitav niz smjernica za projektiranje betonskih konstrukcija armiranih FRP armaturom kao što su: fib bulletin 40, ACI 440.1R-06, CSA S806-12, CNR-DT 203/2006 i JSCE [7]. Također, u novoj generaciji Eurokodova, tj. u normi EN 1992-1-1 postojat će dodatak za proračun betonskih konstrukcija armiranih FRP armaturom. Armiranobetonske se konstrukcije proračunavaju prema graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju uporabljivosti. Za proračun prema graničnom stanju nosivosti važno je uočiti bitnu razliku između ponašanja elemenata armiranih s FRP armaturom i elemenata armiranih čeličnom armaturom. Tu treba naglasiti razliku čelične armature koja ima svojstvo popuštanja i FRP armature koja se ponaša linear-no elastično do sloma, tj. neduktilno. Prema tome betonski elementi armirani FRP

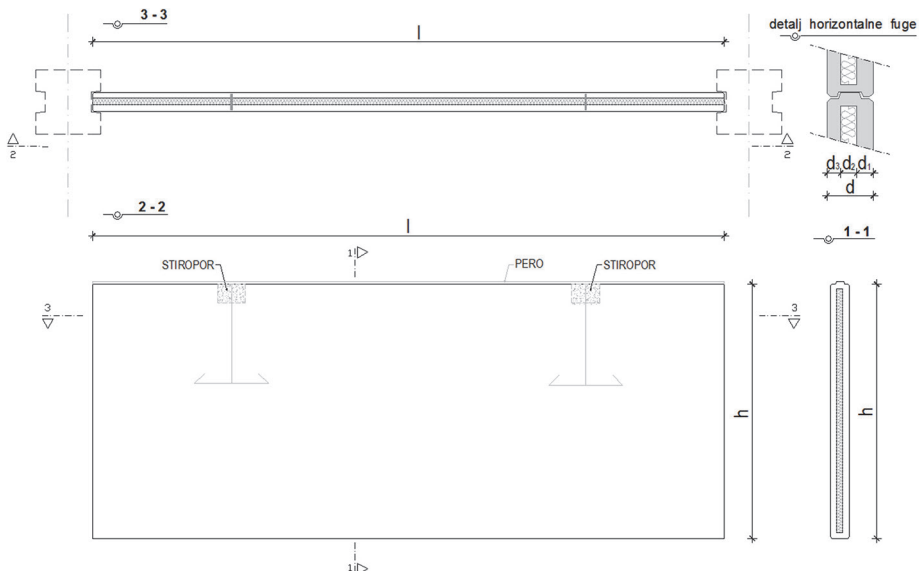
armaturom, za razliku od, onih armiranih čeličnom armaturom, pokazuju znatno manju duktilnost. Kod takvih elemenata beton je duktilniji materijal nego armatura. Brojnim istraživanjima je pokazano da se granično stanje nosivosti elemenata armiranih FRP armaturom treba temeljiti na slomu preko betona u tlačnom području, za razliku od sloma preko armature u klasičnim armiranobetonskim elementima armiranim čeličnom armaturom. Elementi s FRP armaturom, koji su armirani tako da do sloma dođe preko betona u tlačnom području, ipak pokazuju određenu duktilnost što se postiže povećanjem FRP armature [8]. Uglavnom, da bi se došlo do preciznih metoda proračuna ovakvih konstrukcija potrebno je provesti brojna teorijska i eksperimentalna istraživanja što potvrđuju i brojni vodeći znanstvenici u ovom području. Danas se velik broj istraživača bavi ovim problemom o čemu govore i brojni radovi u znanstvenim časopisima i organizirani međunarodni simpoziji na navedenu temu. Upotreba FRP proizvoda za izgradnju betonskih konstrukcija aktualna je za istraživanje ponajviše zbog toga što ovaj materijal (FRP) ne korodira ni u najagresivnijem okolišu, za razliku od betonske konstrukcije armirane čelikom koja ima velike teškoće sa korozijom, naročito ako se nalazi u agresivnoj okolini. Iako treba naglasiti da unatoč većoj trajnosti FRP-a od trajnosti čelika, pod utjecajem vode, što su opisali Starkova i drugi [7, 9] ili temperature, što su opisali Ceroni i drugi [7,10], kao i pod dugotrajnim djelovanjima, što su pokazali Benmokrane i drugi [7, 11] može doći do smanjenja mehaničkih svojstava FRP armature.

Cilj ovog rada je istražiti mogućnost primjene FRP armature za armiranje nosivih dijelova montažnih fasadnih sendvič panela. Primjenom FRP armature kod armiranja sendvič panela smanjila bi se debljina nosivih elemenata i samim time vlastita težina. Debljina nosivih elemenata smanjila bi se zbog toga jer je za osiguranje trajnosti betonske konstrukcije armirane FRP armaturom potrebno izvesti znatno manje zaštitne slojeve nego kod čelične armature. Također, zbog visoke vlačne čvrstoće FRP šipki, smanjila bi se i statička visina betonskog presjeka za istu nosivost elementa na savijanje. Rezultat toga bilo bi smanjenje troškova proizvodnje elemenata i povećanje njihove trajnosti. Da bi se povezali unutarnji i vanjski betonski slojevi panela i postiglo njihovo kompozitno djelovanje u sendvič panele se ugrađuju spojnice. Spojnice mogu biti od čelične armature, FRP armature ili hibridne (kombinacija čelične i FRP armature). Spojnice od FRP armature imaju svoje prednosti ispred čeličnih spojnica što je opisano u točki 3. ovog rada. Mnogi strani istraživači bavili su se upravo istraživanjem primjene spojnica od FRP armature. Istraživali su posmično ponašanje FRP spojnica, ponašanje na savijanje betonskih panela kod korištenja FRP spojnica, nosivost sendvič panela sa dijagonalnim spojnica od FRP armature i sl.

## 2 Proračun predgotovljenih montažnih ab sendvič panela

### 2.1 Osnovne postavke proračuna betonskih panela armiranih čeličnom armaturom

Fasadni sendvič paneli sastoje se od tri sloja. Unutarnji sloj sendvič panela je nosivi element, dok vanjski sloj panela čini fasadni element. U sredini sendvič panela nalazi se sloj toplinske izolacije. U praksi se često vanjski fasadni sloj sendvič panela uzima samo kao opterećenje na temelje, dok se unutarnji nosivi sloj proračunava kao slobodno oslonjena ploča nosiva u jednom (dužem) smjeru. Fasadni paneli mogu se montirati tako da je duži smjer panela orijentiran horizontalno ili tako da je duži smjer panela orijentiran vertikalno. Na slici 1. prikazan je fasadni panel kod kojeg je duži smjer orijentiran horizontalno. Paneli se proračunavaju na horizontalno djelovanje vjetrova dok seizmičke sile preuzimaju stupovi glavnih nosača hale. Kod fasadnih panela, dimenzioniranje na savijanje, prema graničnom stanju nosivosti je mjerodavno za proračun. Ako je dulja stranica panela vodoravna tada se opterećenje od vjetrova prenosi na stupove, a ako je dulja stranica panela vertikalna tada se opterećenje od vjetrova prenosi na temeljnu i vjenčanu gredu.



Slika 1. Skica montažnog fasadnog sendvič panela

Debljina unutarnjeg nosivog sloja,  $d_1$ , obično je 9,0 cm, dok je vanjski fasadni sloj,  $d_3$ , manje debljine, obično 6,0 cm. Središnji sloj izolacije,  $d_2$ , obično je debljine 8 cm. Dakle, ukupna debljina panela,  $d$ , iznosi 23,0 cm. Međutim, navedeni slojevi mogu

biti i drugih dimenzija. Duljina fasadnih panela je obično  $l = 6,0 - 10,0$  m, a visina fasadnih panela obično iznosi  $h = 2,4 - 3,10$  m. Fasadni sendvič paneli proizvode se puni ili sa otvorima za prozore i vrata.

## 2.2 Osnovne postavke proračuna betonskih panela armiranih FRP šipkama

Princip proračuna je jako sličan kao i kod proračuna betonskih konstrukcija armiranih čeličnom armaturom. Proračunska otpornost presjeka određuje se na osnovi uvjeta kompatibilnosti, jednadžbama ravnoteže unutarnjih sila i kontrolom oblika sloma. Nosivost elementa na savijanje ovisi o tome događa li se slom preko betona ili preko FRP armature. Uspoređivanjem koeficijenta armiranja FRP šipkama,  $\rho_f$ , s balansiranim koeficijentom armiranja, određuje se koji se oblik sloma dogodio. Balansirani koeficijent armiranja je postotak armiranja kod kojeg dolazi do istodobnog drobljenja betona i sloma FRP šipki. Ako je  $\rho_f < \rho_{f,bal}$  slom se događa preko FRP šipki, a ako je  $\rho_f > \rho_{f,bal}$  slom se događa preko drobljenja betona. Može se lako ustvrditi da je koeficijent armiranja pri balansiranom slomu za presjek armiran FRP šipkama puno manji nego kod armiranja čeličnom armaturom. Uzrok tomu je velika deformacija kod koje nastaje slom FRP šipki u odnosu na deformaciju čelika kada on popušta. Kao što je ranije spomenuto, istraživanje je pokazalo da je slom preko betona poželjniji nego slom preko FRP armature, jer kod takvog sloma elementi opterećeni na savijanje pokazuju određeno plastično ponašanje prije sloma. Slom drobljenjem betona postiže se povećanjem armature. Ako se želi postići slom elementa preko vlačne FRP armature, tada ne smije biti previše vlačne armature kako bi se izbjeglo drobljenje tlačno napregnutog betona. U ovom slučaju slom preko vlačne FRP armature je iznenađan za razliku od sloma preko vlačne čelične armature gdje je slom duktilan.

Kod sloma preko betona ploština FRP armature može se dobiti iz sume momenata savijanja na težište FRP armature:

$$M_{Ed} = F_c \cdot z \quad (1)$$

$$F_c = f_{cd} \cdot \alpha_v \cdot b \cdot \xi \cdot d \quad (2)$$

$$\xi = \left( \frac{|\varepsilon_{cu2}|}{|\varepsilon_{cu2}| + |\varepsilon_f|} \right) \quad (3)$$

$$z = d - k_a \cdot x = d - k_a \cdot \xi \cdot d \quad (4)$$

$$\zeta = 1 - k_a \cdot \xi \quad (5)$$

S obzirom na to da vrijedi suma horizontalnih sila,  $F_t = F_c$ , potrebna ploština FRP armature dobije se iz izraza (7):

$$M_{Ed} = F_t \cdot z \quad (6)$$

$$A_f = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot \varepsilon_f \cdot E_{fu}} \quad (7)$$

Prilikom ovog proračuna treba paziti da je relativna deformacija FRP armature:  $\varepsilon_f \leq \varepsilon_{fu}$ , tj. da se slom događa preko betona, te je relativna deformacija betona u tlaku  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$ . Također, treba paziti da koeficijent visine tlačnog područja bude:  $\xi \leq \xi_{lim}$ .

U slučaju da se proračunom dobije da je  $\varepsilon_f > \varepsilon_{fu}$  tada to znači da se radi o slomu preko FRP armature i proračun treba napraviti tako da se pretpostavi relativna vlačna deformacija FRP armature  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$  pa se iz uvjeta ravnoteže traži relativna deformacija tlačnog ruba betona.

U izrazima (1) do (7) je:

- $M_{Ed}$  – proračunski moment savijanja,
- $F_c$  – rezultanta tlačnih naprezanja u betonu,
- $Z$  – krak unutarnjih sila,
- $f_{cd}$  – proračunska tlačna čvrstoća betona,
- $\alpha_v$  – koeficijent punoće proračunskog dijagrama betona,
- $k_a$  – koeficijent položaja rezultante tlačnih naprezanja,
- $b$  – širina poprečnog presjeka,
- $d$  – statička visina,
- $\xi$  – koeficijent visine tlačnog područja,
- $\zeta$  – koeficijent kraka unutarnjih sila.

### 3 Spojnice koje povezuju unutarnji i vanjski sloj sendvič panela

Ovisno o postignutom stupnju kompozitnog djelovanja, sendvič panel se može smatrati potpuno kompozitnim, djelomično kompozitnim ili ne kompozitnim elementom.

Kod potpuno kompozitnog djelovanja osiguran je potpuni prijenos sila između dva sloja i panel se ponaša kao cjelina koja odolijeva opterećenjima do trenutka otkazivanja. Otkazivanje se kod takvih panela događa preko betona ili preko uzdužne armature u nosivim slojevima panela, tj. bez otkazivanja spojnica [12]. Kod kompozitnog panela i unutarnji i vanjski sloj zajedno sudjeluju u nosivosti, tj. oba sloja su nosiva. Krutost kompozitnih panela ovisi o konfiguraciji spojnica [13]. Spojnice

trebaju imati odgovarajuću sposobnost prijenosa posmika kako bi se osiguralo dovoljno kompozitno djelovanje i potrebna krutost kompozitnog panela [14].

Paneli opisani pod točkom 2. su ne kompozitni paneli kod kojih je samo unutarnji sloj nosiv, dok je vanjski fasadni sloj ne nosivi element. Kod takvih panela ugradnja spojnice za povezivanje unutarnjeg i vanjskog sloja sendvič panela služi kako bi se postigla veća sigurnost panela kod samog transporta i montaže na gradilištu. Ovo je naročito važno zato jer se u praksi paneli često dižu, prevoze i montiraju prije nego beton dosegne 100 % projektirane čvrstoće [12]. Navedene spojnice nemaju kapacitet prenosa posmika, te se kod proračuna panela na savijanje ne uzima u obzir zajedničko djelovanje unutarnjeg i vanjskog sloja.

Djelomično kompozitni paneli su paneli kod kojih spojnice mogu prenijeti samo dio sile između dva sloja. U tom slučaju, spojnice otkazuju prije nego dođe do sloma preko betona ili uzdužne armature u nosivim slojevima panela [12].

Benayoune i drugi su u svom radu [12] istražili ponašanje na savijanje montažnog betonskog kompozitnog sendvič panela. Rezultati testova pokazali su da je način otkazivanja i obrazac pukotina kod sendvič panela vrlo sličan onima kod krutih monolitnih ploča, posebno kada se oba betonska sloja ponašaju potpuno kompozitno. Chen i drugi u svom radu [15] istraživali su posmične karakteristike spojnice od FRP materijala. Proučavali su kako oblik poprečnog presjeka spojnice, razmak spojnica, duljina sidrenja spojnice i debljina izolacijskog sloja panela utječu na posmičnu sposobnost spojnice, tj. na krutost panela kao kompozitnog elementa. Spojnice sa pravokutnim poprečnim presjekom pokazale su veću posmičnu otpornost od spojnice sa kružnim poprečnim presjekom. Također, razmak između spojnica pokazao je značajan utjecaj na krutost panela. Povećanjem razmaka spojnice krutost panela se smanjila. Nadalje, rezultati navedenih ispitivanja pokazali su da duljina sidrenja spojnice značajno utječe na posmičnu sposobnost spojnice u kompozitnom panelu. Povećanjem duljine sidrenja, povećava se posmični kapacitet spojnice i krutost kompozitnog panela. Analiza debljine sloja toplinske izolacije fasadnog panela pokazala je da se povećanjem debljine izolacijskog sloja smanjuje posmični kapacitet spojnice.

Danas široku primjenu imaju čelične spojnice za povezivanje slojeva panela, ali primjećuju se veliki gubici topline u takvim panelima zbog toplinskih mostova uzrokovanih čelikom [16,17]. Proizvođači u svijetu zato sve više preferiraju FRP spojne elemente u odnosu na tradicionalne čelične spojne elemente zbog njihovih izvrsnih toplinsko-izolacijskih svojstava i otpornosti na koroziju. Rezultat korištenja FRP spojnice je energetski učinkovit sendvič panel koji ima tanji unutarnji sloj od ne kompozitnog panela i veću trajnost. Međutim, iako je korištenje spojnice od FRP materijala korisno u svrhu toplinske izolacije i trajnosti elemenata, niski modul elastičnosti i posmična čvrstoća, kao i krhki način otkazivanja, ometaju široku primjenu spojnice od FRP materijala. Zbog toga se neki svjetski istraživači bave istraživanjem hibridnih



spojnica gdje kombiniraju dobre karakteristike FRP i čelične armature. Tako su npr. Wang i drugi u svom radu [18] istraživali ponašanje na savijanje sendvič panela kod kojeg su korištene čelične spojnice obložene FRP materijalom. Takva inovativna hibridna spojnica u usporedbi s čeličnim ili FRP spojnica omogućuje veću posmičnu otpornost spojnica, tj. veću nosivost na savijanje sendvič panela, te veću energetsku učinkovitost sendvič panela zbog dobrih toplinskih svojstava FRP materijala.

## 4 Zaključak

Pregled literature pokazao je veliki potencijal primjene FRP armature za armiranje fasadnih montažnih sendvič panela, ali i nedovoljnu istraženost područja. FRP armatura zbog povoljnih toplinskih svojstava ima sve veću primjenu kao spojni element kod sendvič panela čime se eliminira mogućnost pojave toplinskog mosta. Ali, zbog niske posmične čvrstoće, krutost FRP spojeva je manja u usporedbi s drugim spojevima. Budući da ponašanje sendvič panela uvelike ovisi o krutosti spojeva, potrebno je nastaviti istraživati utjecaj FRP spojeva male krutosti na ponašanje betonskih sendvič panela ili provesti potrebna ispitivanja kako bi se hibridna spojnica iz točke 3. mogla šire upotrebljavati kod montažnih sendvič panela. Navedena ispitivanja su naročito važna ako se želi sa dovoljnom preciznošću projektirati potpuno kompozitno djelovanje sendvič panela čime bi se značajno povećala krutost panela a samim time smanjila debljina betonskih slojeva kao i količina glavne uzdužne FRP armature.

Također, trebalo bi ispitati i usporediti nosivost na savijanje potpuno kompozitnog sendvič panela sa monolitnim panelom te vidjeti na koji se način može odrediti statička visina kompozitnog sendvič panela, tj. kakva je mogućnost primjene proračuna opisanog pod točkom 2. kod potpuno kompozitnog djelovanja. Uz navedena istraživanja valjalo bi također istražiti i mogućnost nosivosti panela u oba smjera čime bi se dodatno mogla smanjiti naprezanja u ploči panela a samim time smanjili bi se i troškovi izrade montažnih fasadnih sendvič panela.

## Literatura

- [1] Renić, T., Kišiček, T.: Ductility of Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars, Buildings, 11 (2021), 9; 424, 21. doi:10.3390/buildings11090424.
- [2] Tomičić, I.: Ojačavanje armiranobetonskih greda nemetalnim lamelama, GRAĐEVINAR 53 (2001) 10, 641-649.
- [3] ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, ACI 440.1R-15, American Concrete Institute, 2015.

- [4] Kišiček, T., Stepinac, M., Renić, T., Hafner, I., Lulić, L. (2020) Pojačanje žida na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a. *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 10, str. 937-953. doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2983.2020>.
- [5] Galić, J.: Ojačanje zidanih stupova i zidova uporabom polimera armiranih vlaknima, *DOKTORSKI RAD* (2011), Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- [6] Kišiček, T., Renić, T., Hafner, I., Stepinac, M.: Maximum FRP Bar Diameter and Bar Spacing for Crack Control in Flexural Reinforced Concrete Members // 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Proceedings of CICE 2020/2021 /Ilki,Alper ; Ispir, Medine ; Inci, Pinar (ur.). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021. str. 621-631 doi:10.1007/978-3-030-88166-5\_53.
- [7] Renić, T.: Duktilnost betonskih greda s FRP armaturom i ovijenim tlačnim područjem, *DOKTORSKI RAD* (2022), Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- [8] Kišiček, T.: Progibi betonskih greda sa FRP armaturom, *DOKTORSKI RAD* (2006), Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- [9] Starkova, O., Aniskevich, K., Sevchenko, J.: Long-term moisture absorption and durability of FRP pultruded rebars, *Mater. Today Proc.* 34 (2021) 36–40, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.154>.
- [10] Ceroni, F., Cosenza, E., Gaetano, M., Pecce, M.: Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members, *Cemenet Concr. Compos.* 28 (2006) 857–868. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004>.
- [11] Benmokrane, B., Brown, V.L., Ali, A.H., Mohamed, K., Shield, C.: Reconsideration of the Environmental Reduction Factor  $C_e$  for GFRP Reinforcing Bars in Concrete Structures, *J. Compos. Constr.* 24 (2020) 1–6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001040](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001040).
- [12] Benayoune, A., Abdul Samad, A.A., Trikha, D.N., Abang Ali, A.A., Ellinna, S.H.M.: Flexural behaviour of pre-cast concrete sandwich composite panel – Experimental and theoretical investigations, *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 4, April 2008, Pages 580-592.
- [13] Egbon, B. and Tomlinson, D.: Experimental investigation of longitudinal shear transfer in insulated concrete wall panels with notched insulation, *Journal of Building Engineering*, vol. 43, Article ID 103173, 2021.
- [14] Xie, H. L., Fang, H., Cai, W., Wan, L., Huo, R. L., Hui, D.: Development of an innovative composite sandwich matting with GFRP facesheets and wood core, *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 60, no. 1, pp. 80–91, 2021.
- [15] Chen, D., Li, K., Yuan, Z., Cheng, B., Kang, X.: Shear Behavior of FRP Connectors in Precast Sandwich Insulation Wall Panels, *Buildings*, 12 (2022), 1095, <https://doi.org/10.3390/buildings12081095>.

- [16] Huang, K., Xie, J., Wang, R., Feng, Y., Rao, R.: Effects of the combined usage of nanomaterials and steel fibres on the workability, compressive strength, and microstructure of ultra-high performance concrete, *Nanotechnology Reviews*, vol. 10, no. 1, pp. 304–317, 2021.
- [17] Yu, S., Liu, Y., Wang, D., Ma, C., Liu, J.: Theoretical, experimental and numerical study on the influence of connectors on the thermal performance of precast concrete sandwich walls, *Journal of Building Engineering*, vol. 57, Article ID 104886, 2022.
- [18] Wang, Y., Wang, J., Zhao, D., Hota, G., Liang, R., Hui, D.: Flexural Behavior of Insulated Concrete Sandwich Panels using FRP-Jacketed Steel-Composite Connectors, *Hindawi*, Volume 2022, Article ID 6160841, <https://doi.org/10.1155/2022/6160841>.

# Utjecaj topološke optimizacije na povećanje otpornosti stupa na izvijanje

Ivana Zovko<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac<sup>2</sup>, prof. dr. sc. Josip Galić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Arhitektonski fakultet, ivana.zovko@arhitekt.hr; josip.galic@arhitekt.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marko.bartolac@grad.unizg.hr

## Sažetak

Pojavom 4.0 industrije stvoreni su preduvjeti kreiranju složenih arhitektonskih formi i optimiziranog konstruktivnog sustava u pogledu odnosa nosivosti i utroška materijala. Promatrajući biološke strukture stvoren je uzorak trostruko periodične minimalne površine (eng. triply periodic minimal surface - TPMS). Provedena je linearna elastična analiza izvijanja stupa punog presjeka i stupova modeliranih u TPMS formi i optimiziranim u tri razine. Preliminarna analiza je provedena u svrhu prikaza mogućnosti oblikovanja i nosivosti ovakvih formi nosivih elemenata te će poslužiti za daljnja istraživanja oblikovanja i optimizacije aditivno proizvedenih nosivih elemenata.

*Key words: topološka optimizacija, aditivna proizvodnja, TPMS strukture, izvijanje, stup*

## The influence of topology optimization on the increase in column buckling resistance

### Abstract

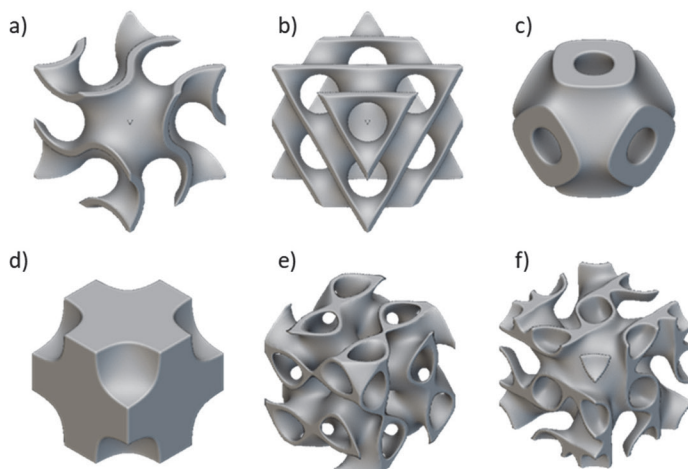
The emergence of 4.0 industry has created the prerequisites for the creation of complex architectural forms and an optimized construction system in terms of load-bearing capacity and material consumption. By observing biological structures, a triple periodic minimum surface (TPMS) pattern was created. A linear elastic buckling analysis was performed on a full section column and on columns shaped as TPMS lattice structure and optimized in three levels. The preliminary analysis was carried out to show the possibility of design and load bearing capacity of such forms of load-bearing elements and will serve for further research into the design and optimization of additively produced load-bearing elements.

*Ključne riječi: topological optimization, additive manufacturing, TPMS structures, buckling, column*

## 1 Uvod

Aditivna proizvodnja (poznata kao 3D printanje) predstavlja veliki potencijal za digitalizaciju i automatizaciju procesa izgradnje konstrukcija. Takva tehnologija već se naveliko primjenjuje u drugim strukama kao što su medicina [1], svemirska i zrakoplovna industrija [2] te automobilska industrija [3]. Neki od problema implementacije ove tehnologije u građevinski sektor su: mali broj materijala pogodnih za 3D ispis, ograničenje veličine objekata koji se mogu printati, lošija mehanička svojstva aditivno izvedenih konstrukcija u odnosu na tradicionalne konstrukcije, nepostojanje regulative za ovakav tip gradnje konstrukcija [4]. Ipak, benefiti uporabe 3D printanja u građevinarstvu razlog su sve većem interesu za istraživanja i implementaciju ove tehnologije. Izvedba uporabom 3D printanja brža je i jeftinija u odnosu na tradicionalne načine izgradnje. Budući da je produkt 3D printanja gotova konstrukcija, eliminira se potreba za uporabom oplata kao pri gradnji betonskih konstrukcija. Ukidaju se geometrijska ograničenja tradicionalne izgradnje što arhitektima omogućava veću slobodu u projektiranju konstrukcija [5]. Ovo stvara mogućnosti za većom integracijom arhitekture i umjetnosti [6]. Budući da se izgradnja odvija strojno, smanjuje se potreba za ljudskom radnom snagom. Iz aspekta održivosti gradnje aditivnom tehnologijom, smanjuje se emisija CO<sub>2</sub> i produkcija otpada [5].

Priroda je rezultat dugotrajne evolucije kojom se organizmi prilagođavaju za ispunjavanje određene funkcije unutar ograničenja koja im nameće sam organizam ili sredina u kojoj se nalaze [7]. Ova činjenica potaknula je razvoj biomimetike, nove grane znanosti koja proučava prirodu, a zatim oponaša njene oblike, procese, sustave i strategije u svrhu iznalaženja najboljih održivih rješenja za inženjerske probleme [8]. Potencijal za primjenu ovakvih rješenja u raznim strukama znatno je porastao s razvojem aditivne proizvodnje koja omogućava jednostavno kreiranje kompleksnih formi [7]. Proučavajući organizme morskih ježeva, ljuski leptirovih krila i egzoskeleta kornjaša i žižaka pronađene su strukture minimalnih trostrukih periodičnih površina (eng. akronim TPMS) [9]. TPMS je periodična površina koja se može precizno opisati matematičkom funkcijom. Mijenjajući parametre funkcije mogu se kontrolirati svojstva strukture kao što su volumen specifične površine i poroznost [10]. TPMS strukture formiraju se od gradbenih jedinica, a neke od njih prikazane su na slici 1. Rešetkaste strukture intenzivno su proučavane zbog svojstava male vlastite težine, velike apsorpcije energije i velikog odnosa krutosti naspram vlastite težine. TPMS strukture pokazuju puno bolja svojstva usporedno sa drugim rešetkastim strukturama kao što su rešetkaste štapne strukture [11].



Slika 1. TPMS gradbene jedinice: a) gyroid; b) diamond; c) schwarz; d) neovius; e) lidinoid; f) splitP

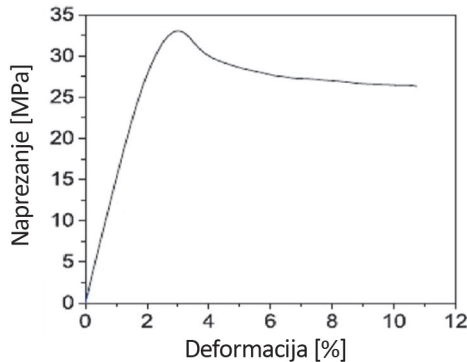
Kompjuterski potpomognut dizajn (eng. *computer-aided design* - CAD) najčešće je korišten alat za digitalno modeliranje elemenata. Elementi su najčešće definirani površinama i bridovima što daje dovoljno informacija za njihovu proizvodnju tradicionalnim metodama. Međutim, takvo modeliranje elemenata ne pruža informacije o unutarnjoj strukturi elemenata i time nije najpovoljniji za aditivnu proizvodnju koja printa element sloj po sloj. Implicitno modeliranje opisuje elemente implicitnim matematičkim funkcijama. Moguće je definirati svojstva svake točke prostora što omogućava modeliranje znatno kompleksnije strukture, a modelirani elementi spremni su za 3D ispis [12, 13]. Implicitno modeliranje omogućuje jednostavno modeliranje TPMS struktura.

Razvojem računalnih metoda za projektiranje i analizu konstrukcija omogućena je optimizacija konstrukcija. Jedan od glavnih ciljeva konstrukcijske optimizacije je minimiziranje ukupnih troškova konstrukcije. Jedan od načina kako to postignuti je smanjenjem ukupne težine konstrukcije. Optimizacije se može provoditi i u svrhu poboljšanja određenih karakteristika konstrukcije kao što su mehaničko ponašanje, aerodinamička svojstva i dinamičko seizmičko ponašanje konstrukcije [14].

U ovom radu analizirano je ponašanje stupa u TPMS formi *diamond*. Shah et al. proveli su ispitivanje stupova izvedenih od četiri vrste TPMS struktura na izvijanje [15]. Ispitivanje je pokazalo da stupovi u *diamond* formi imaju najbolju otpornost na izvijanje. Stup analiziran u ovom radu optimiziran je u tri razine. Metodologija i rezultati istraživanja dani su u sljedećim poglavljima.

## 2 Metodologija

Analiziran je stup kvadratnog poprečnog presjeka dimenzija stranica 0.5 m i visine 4 m u programskom paketu nTopology. Kao materijal odabrana je plastika ASA (eng. *Acrylonitrile Styrene Acrylate - ASA*) često korištena u aditivnoj proizvodnji, a dijagram naprezanja i deformacija ovog materijala prikazan je na slici 2. Iako je riječ o vrsti plastike, korišteni software ima određena ograničenja i može definirati materijal samo kao linearno elastičan.



Slika 2. Dijagram naprezanja i deformacija nastalih uslijed vlačnog testa za materijal ASA [16]

Modul elastičnosti tog materijala varira od 1450 MPa do 2500 MPa, a za potrebe ovog rada usvojena je vrijednost od 1900 MPa. Gustoća materijala iznosi 1000 kg/m<sup>3</sup>. Analizirana je otpornost stupa na izvijanje. U programskom paketu nTopology provedena je linearna elastična analiza izvijanja, tzv. „*buckling*“ analiza. Kao opterećenje uzeta je jedinična vrijednost uzdužne tlačne sile (1 kN). Stup je na jednom kraju pridržan zglobnim pomičnim, a na drugom kraju zglobnim nepomičnim osloncem.

Prvo je analizirana nosivost punog poprečnog presjeka stupa, a zatim je provedena optimizacija stupa u tri razine:

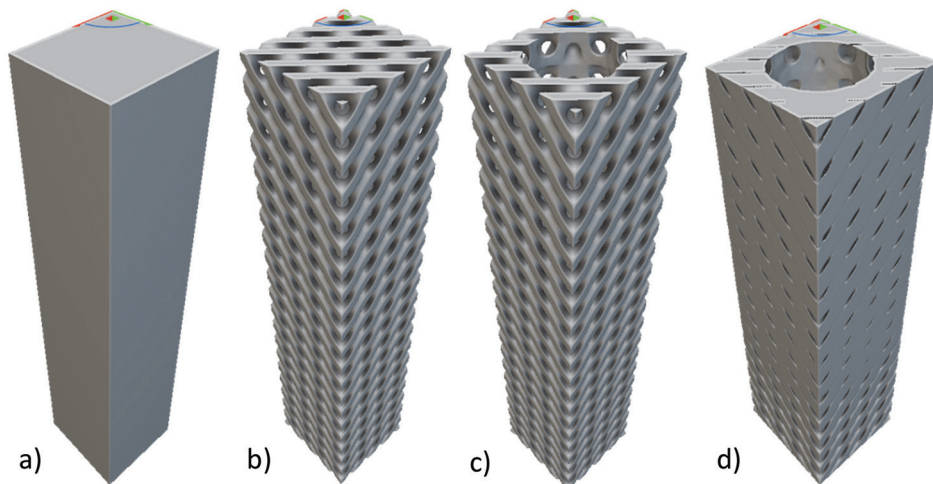
1. Za poprečni presjek stupa odabrana je TPMS struktura *diamond* za koju je u radu [15] utvrđeno da se najbolje ponaša prilikom izvijanja.
2. Na stupu punog poprečnog presjeka provodi se topološka optimizacija. Volumen stupa smanjuje se za 30 %, a stup se optimizira na uzdužno tlačno djelovanje te na horizontalno djelovanje vjetra. Sva opterećenja zadana su kao jedinična (1 kN). Svaki slučaj opterećenja topološka optimizacija razmatra zasebno. Zadano je da konačni presjek stupa bude simetričan. Zatim se topološki optimizirana forma oblikuje u strukturu *diamond* konstantne debljine stijenki.
3. Topološki se optimizira stup punog poprečnog presjeka prema jednakim ulaznim podacima kao i stup pod točkom 2. Zatim se na njemu provodi statička

analiza u svrhu određivanja napreznja u stupu. Na temelju rezultata statičke analize zadaje se presjek *diamond* s varijabilnom debljinom stijenke poprečnog presjeka. Stijenka se podebljava na mjestima većih napreznja, a smanjuje na mjestima manjih napreznja. Svrha ove optimizacije je dobiti jednolika napreznja od uzdužne tlačne sile po visini presjeka.

Kao rezultat „*buckling*“ analize dobiva se kritični množitelj opterećenja za prvi mod izvijanja. Budući da je opterećenje zadano kao jedinično, kritični množitelj opterećenja predstavlja vrijednost kritične sile izvijanja. Analize su provedene varirajući debljinu stijenke TPMS stupova kako bi se prikazao njen utjecaj na rezultate.

### 3 Rezultati

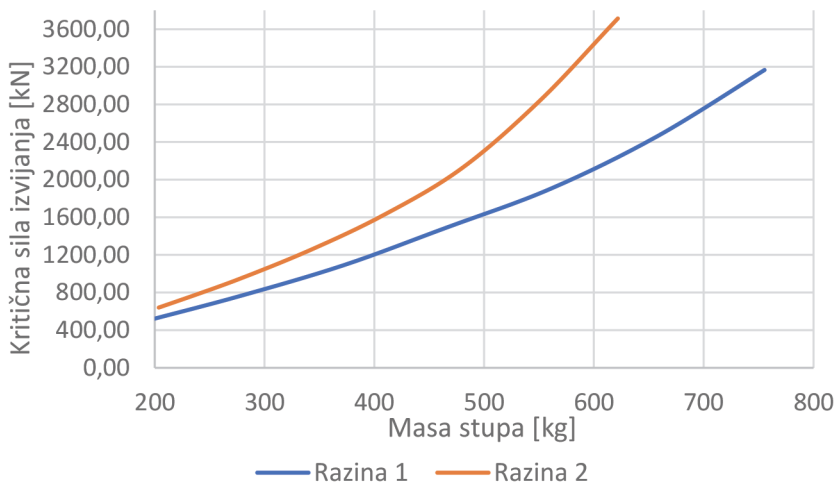
Kao rezultat svake razine optimizacije dobiva se drugačiji poprečni presjek stupa. Presjeci su prikazani na slici 3. Oblikovanjem stupa u TPMS strukturu *diamond* presjek stupa se prošupljuje (slika 3.b). Topološkom optimizacijom stup prelazi u cilindar čija se šupljina postepeno smanjuje prema gornjem i donjem rubu presjeka. Slika 3.c) prikazuje presjek kroz topološki optimiziran stup oblikovan u formi *diamond* (razina optimizacije 2). Stup je simetričan i time je izbjegnuta pojava slabije osi presjeka. Treća razina optimizacije provedena je kako bi se dobila uniformna raspodjela napreznja uslijed uzdužne tlačne sile. Debljina stijenke stupa zadana je kao varijabla napreznja i kreće se od 3 cm do 9 cm. Kao rezultat dobiven je presjek stupa prikazan na slici 3.d).



Slika 3. Presjek kroz polovicu visine stupa: a) puni presjek; b) razina optimizacije 1 (*diamond*); c) razina optimizacije 2 (topološki optimiziran *diamond*); d) razina optimizacije 3 (topološki optimiziran *diamond* promjenjive debljine stijenki)



Linearnom elastičnom analizom istog stupa dobiva se da je kritična sila izvijanja takvog stupa 5796 kN. Masa stupa punog poprečnog presjeka iznosi 1000 kg. Svrha optimizacije je smanjenje utroška materijala tj. njegova bolja raspodjela. Dijagram na slici 4. prikazuje odnos mase i kritične sile izvijanja za razine optimizacije 1 i 2. Rezultat topološke optimizacije je veća otpornost na izvijanje olakšanog stupa oblikovanog u formi *diamond*. S povećanjem debljine stijenke stupova povećava se masa stupova, a kritična sila izvijanja raste eksponencijalno. S povećanjem mase, povećava se i razlika između otpornosti na izvijanje za razine 1 i 2.



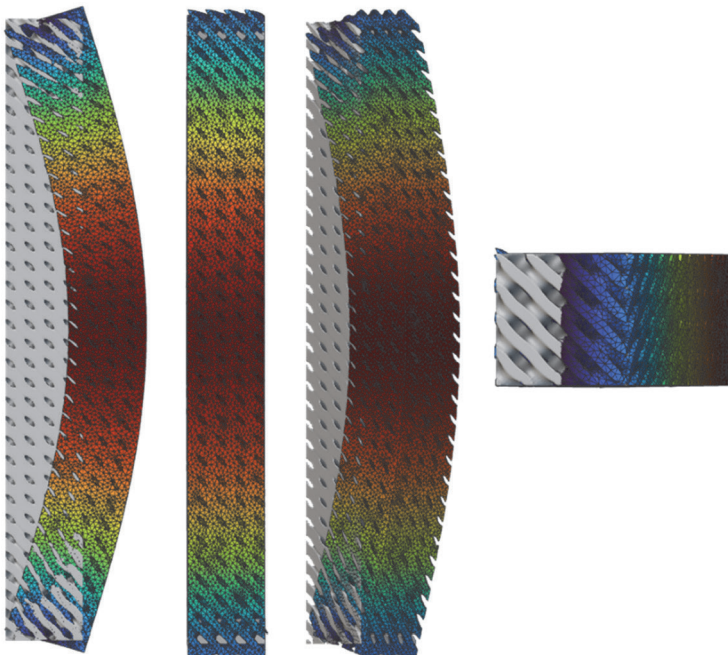
Slika 4. Ovisnost kritične sile izvijanja i mase stupa za prvu i drugu razinu optimizacije stupa

Tablica 1 prikazuje kvantificirano rezultate kao razlike u masama i kritičnim množiteljima opterećenja svake razine optimizacije u odnosu na svojstva punog stupa. Analize su provedene varirajući debljinu stijenke TPMS stupova kako bi se prikazao njen utjecaj na rezultate. Za razinu optimizacije 1 nije provedena analiza za debljinu stijenke od 9 cm, a za razinu optimizacije 2 za debljinu stijenke od 2 cm. Razlog tome je problem s generiranjem mesh-a.

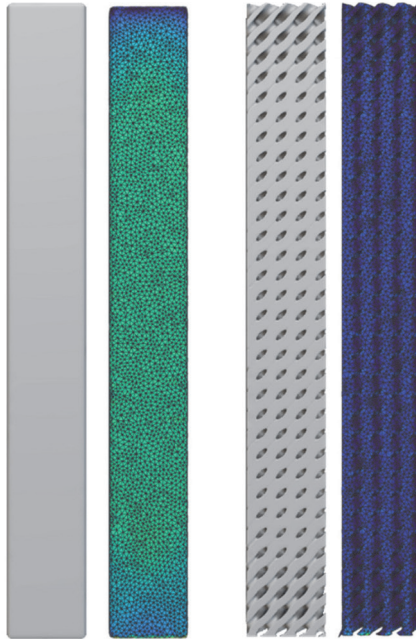
**Tablica 1. Razlike u masama i kritičnim silama izvijanja svake razina optimizacije u odnosu na puni stup**

Puni stup		Debljina stijenke t [cm]	Razina optimizacije 1		Razina optimizacije 2		Debljina stijenke t [cm]	Razina optimizacije 3	
$m_p$ [kg]	$\alpha_{crit,p}$		$m_1/m_p$ (%)	$\alpha_{crit,1}/\alpha_{crit,p}$ (%)	$m_2/m_p$ (%)	$\alpha_{crit,2}/\alpha_{crit,p}$ (%)		$m_3/m_p$ (%)	$\alpha_{crit,3}/\alpha_{crit,p}$ (%)
1000	5796	2	19%	8%	/	/	3-9 cm	57%	60%
		3	28%	13%	20%	11%			
		4	37%	19%	27%	16%			
		5	47%	26%	34%	22%			
		6	56%	33%	41%	28%			
		7	66%	42%	48%	37%			
		8	76%	55%	55%	49%			
		9	/	/	62%	64%			

U tablici 1. istaknuti su rezultati približno jednakih masa elemenata. Razina optimizacije 1 za iznos mase od 56 % mase punog stupa daje 33 % iznosa kritične sile izvijanja punog stupa. Za približno isti postotak mase stupa taj postotak kritične sile raste sa razinom optimizacije 2 na 49 %. Razinom optimizacije 3 dobiva se najveći iznos kritične sile izvijanja presjeka *diamond* i iznosi 60 % kritične sile izvijanja punog stupa. Iako je kritična sila izvijanja prošupljenih presjeka manja nego kritična sila punog stupa, ona se može u nekoj mjeri povećati optimiziranjem forme stupa. Slika 5. prikazuje stup izvijen u prvom obliku (modu). Stup se izvija oko jedne od glavnih osi presjeka.


**Slika 5. Prvi oblik izvijanja stupa**

Zadnjom, 3. razinom optimizacije stup je topološki optimiziran na 70 % volumena stupa punog poprečnog presjeka, a debljina stijenke varira mu od 3 do 9 cm. Masa dobivenog stupa je 573,47 kg, a kritični množitelj opterećenja koji se dobije linearnom elastičnom analizom izvijanja iznosi 3480,24. Dakle, razinom optimizacije 3 dobiva se stup najveće otpornosti na izvijanje s obzirom na količinu utrošenog materijala i jednodika naprezanja uslijed uzdužne tlačne sile prikazana na slici 6.



Slika 6. Naprezanja uslijed tlačne sile na topološki optimiziranom stupu punog presjeka (lijevo) i stupa optimiziranog na razini 3 (desno)

## 4 Rasprava i zaključak

Aditivna proizvodnja predstavlja veliki potencijal za građevinski sektor. Građevinski sektor spor je u implementaciji novih tehnologija u odnosu na druge struke koje već naveliko koriste mogućnosti koje im ta tehnologija pruža.

Razvojem novih softwera koji rade prema principu implicitnog modeliranja omogućava oblikovanje i definiranje svake točke prostora tj. elementa. Takav tip modeliranja omogućava kreiranje složenijih arhitektonskih oblikovnih formi koje je teško izgraditi tradicionalnim tehnologijama proizvodnje, ali moguće ih je proizvesti uporabom 3D printanja.

Topološka optimizacija podrazumijeva raspodjelu materijala unutar elementa prema djelovanjima ili naprezanjima koja se u njima javljaju. Koncentracija materijala

povećava se na mjestima većih naprezanja, a smanjuje na mjestima manjih. To vodi do istovremenog povećanja nosivosti i smanjenja vlastite težine elementa čime se ostvaruje ušteda utrošenog materijala.

U ovom radu provedena je linearna elastična analiza izvijanja na stupu punog poprečnog presjeka i stupovima oblikovanim u TPMS formi diamond. Stupovi su optimizirani u tri razine. Rezultati pokazuju da topološkom optimizacijom za manje utrošenog materijala ostvarujemo bolju otpornost elementa na izvijanje. Postavljenjem debljine stijenke kao varijable naprezanja materijal se koncentrira na mjestima većih naprezanja, a smanjuje na mjestima manjih naprezanja. Time se dobivaju jednolika naprezanja po cijelom stupu.

Cilj ovog rada bilo je prikazati mogućnost modeliranja stupa u složeniju arhitektonsku formu i utjecaj topološke optimizacije na povećanje otpornosti elementa. Međutim, ova tehnologija još je u fazi intenzivnog istraživanja. Za uspješno modeliranje i proizvodnju nosivih elemenata ovom tehnologijom potrebno je definirati mehanička svojstva materijala. Potrebno je istražiti kako različiti parametri proizvodnje utječu na svojstva materijala.

Daljnje istraživanje na temu topološki optimiziranih nosivih elemenata za proizvodnju aditivnom tehnologijom odnosit će se na iznalaženje novih trodimenzionalnih formi nosivih elemenata i analiziranje njihova ponašanja i otpornosti na različita djelovanja.

## Literatura

- [1] Bozkurt Y, Karayel E. 3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends. *J Mater Res Technol* 2021;14:1430–50. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.07.050>.
- [2] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, Brooks M, Pitot J, Lopez E, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Mater Des* 2021;209:110008. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2021.110008>.
- [3] Vasco JC. Additive manufacturing for the automotive industry. *Addit Manuf* 2021:505–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00010-0>.
- [4] Ali MH, Issayev G, Shehab E, Sarfraz S. A critical review of 3D printing and digital manufacturing in construction engineering. *Rapid Prototyp J* 2022;28:1312–24. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2021-0160>.
- [5] El-Sayegh S, Romdhane L, Manjikian S. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. *Arch Civ Mech Eng* 2020;20:1–25. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w>.

- [6] Feng L, Yuhong L. Study on the Status Quo and Problems of 3D Printed Buildings in China. *Glob J HUMAN-SOCIAL Sci H Interdiscip* 2014;14:1–4.
- [7] du Plessis A, Broeckhoven C, Yadroitsava I, Yadroitsev I, Hands CH, Kunju R, et al. Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. *Addit Manuf* 2019;27:408–27. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.033>.
- [8] Rao R, Associate A. International Journal of Advanced Research in Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering and Developing Biomimicry in Architecture. *Int J Adv Res Civil, Structural, Environmental Infrastruct Eng Dev* 2014:2320–723.
- [9] Han L, Che S. An Overview of Materials with Triply Periodic Minimal Surfaces and Related Geometry: From Biological Structures to Self-Assembled Systems. *Adv Mater* 2018;30. <https://doi.org/10.1002/adma.201705708>.
- [10] Feng J, Fu J, Yao X, He Y. Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications. *Int J Extrem Manuf* 2022;4:022001. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac5be6>.
- [11] Saleh M, Anwar S, Al-ahmari AM. Compression Performance and Failure Analysis of 3D-Printed Carbon Fiber / PLA Composite TPMS Lattice Structures 2022.
- [12] Li Q, Hong Q, Qi Q, Ma X, Han X, Tian J. Towards additive manufacturing oriented geometric modeling using implicit functions 2018:1–16.
- [13] Allen G. nTopology Modeling Technology n.d.
- [14] Mei L, Wang Q. Structural Optimization in Civil Engineering : A Literature Review 2021.
- [15] Shah GJ, Nazir A, Lin SC, Jeng JY. Design for Additive Manufacturing and Investigation of Surface-Based Lattice Structures for Buckling Properties Using Experimental and Finite Element Methods. *Materials (Basel)* 2022;15:1–20. <https://doi.org/10.3390/ma15114037>.
- [16] De León AS, Núñez-Gálvez F, Moreno-Sánchez D, Fernández-Delgado N, Molina SI. Polymer Composites with Cork Particles Functionalized by Surface Polymerization for Fused Deposition Modeling. *ACS Appl Polym Mater* 2022;4:1225–33. <https://doi.org/10.1021/acsapm.1c01632>.

# Procjena oštećljivosti armiranobetonskih zgrada u Gradu Zagrebu

**Nika Rakas<sup>1</sup>**, izv. prof. dr. sc. **Josip Atalić<sup>2</sup>**, izv. prof. dr. sc. **Marta Šavor Novak<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, nika.rakas@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, josip.atalic@grad.unizg.hr

<sup>3</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marta.savor.novak@grad.unizg.hr

## Sažetak

Procjena potresnog rizika najčešće polazi od očekivanog oštećenja građevina na temelju kojeg se proračunavaju moguće opasnosti za zdravlje i život ljudi te financijski gubici zbog nastale štete. Faktori koji sačinjavaju rizik od potresa su seizmička opasnost/hazard, izloženost izgrađenog okoliša te fizička oštećljivost pojedinog tipa građevina. U ovom radu naglasak je stavljen na oštećljivost armiranobetonskih zgrada na području jedne gradske četvrti Zagreba kao testnog područja pri čemu je korištena makroseizmička metoda za određivanje srednjeg stupnja oštećenja.

*Ključne riječi: procjena rizika od potresa, procjena oštećljivosti, armiranobetonske zgrade, baza podataka zgrada, karakteristike zgrada, makroseizmička metoda*

## Assessment of Vulnerability of Reinforced Concrete Buildings in the City of Zagreb

### Abstract

The assessment of seismic risk typically starts with the expected damage to buildings, based on which potential hazards to human health and life, as well as financial losses due to the resulting damage, are calculated. The factors that constitute earthquake risk include seismic hazard, exposure of the built environment, and the physical vulnerability of specific types of buildings. This study focuses on the vulnerability of reinforced concrete buildings in one Zagreb district as the test bed area, utilizing the macroseismic method to determine the mean damage grade.

*Key words: earthquake risk assessment, vulnerability assessment, reinforced concrete buildings, building database, characteristics of buildings, macroseismic method*

## 1 Uvod

Potres je prirodna katastrofa koja se može dogoditi u bilo kojem trenutku, a nemoguće ju je spriječiti i predvidjeti. Rezultat je naglog oslobađanja nakupljene elastične potencijalne energije unutar određenog područja Zemljine kore što izaziva podrhtavanje tla i širenje seizmičkih valova, uz stvaranje topline [1]. Prema Europskoj karti seizmičkog hazarda, Hrvatska je jedna od potresno najugroženijih država u Europi [2], a područja najjače potresne izloženosti su ujedno i područja najveće naseljenosti, odnosno područja velike gospodarske i društvene važnosti. Procjena potresnog rizika predstavlja važan korak za uvođenje mjera koje mogu smanjiti potencijalne gubitke i štete. Određivanje potencijalnih gubitaka većemo za oštećenja izloženih građevina (krivulje oštetljivosti) jer u većini razornih potresa glavni uzroci gubitaka ljudskih života jesu oštećenja, odnosno djelomično ili potpuno rušenje građevina. U novije vrijeme, armiranobetonske konstrukcije uglavnom su prvi izbor pri određivanju nosivog sustava, a u slučaju rušenja mogu izazvati teže posljedice i od zidanih konstrukcija. Najveći problem predstavljaju odstupanja od suvremenih načela projektiranja seizmičke otpornosti (horizontalne i vertikalne nepravilnosti, nepovoljne rekonstrukcije i slično) [3].

Pri uspostavi modela rizika od potresa na nekoj lokaciji potrebno je u obzir uzeti seizmički hazard, izloženost izgrađenog okoliša i stanovništva te pridružiti odgovarajuću razinu fizičke oštetljivosti pojedinim tipovima građevina [4] (slika 1.). Seizmički hazard je jedini čimbenik na koji nije moguće utjecati, dok poznavanje i utjecaj na preostala dva, izloženost i fizičku oštetljivost, mogu ublažiti posljedice djelovanja potresa.



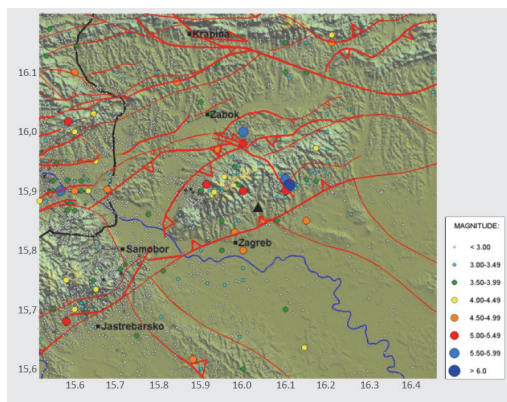
Slika 1. Faktori koji sačinjavaju rizik od potresa

Fizička oštetljivost može se definirati kao podložnost izloženih građevina učincima potresa (oštećenjima), a cilj je njezine procjene određivanje vjerojatnosti prekoračenja zadane razine oštećenja određene vrste (tipa) građevine zbog potresnog djelovanja određenog intenziteta. Mogućnost njenog kvantificiranja vrlo je značajna

za određivanje pouzdanih modela procjene ekonomskih i društvenih gubitaka zbog budućih potresa. U suvremenim procjenama rizika najčešće se razina fizičke oštetljivosti građevina opisuje pomoću krivulja oštetljivosti i/ili pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja. Razvijene su različite metode procjene fizičke oštetljivosti, a možemo ih svrstati u dvije glavne kategorije: empirijske i analitičke. Također, oba pristupa se mogu upotrijebiti i u hibridnim metodama [5]. Rezultat procjena oštetljivosti je razvrstavanje tipova građevina u pojedine kategorije (postoje različite kategorizacije) prema očekivanim razinama i rasprostranjenosti oštećenja. Procjena fizičke oštetljivosti, kao jedna od tri komponente procjene rizika, predmet je ovog istraživanja u sklopu projekta “Potresni rizik Grada Zagreba”, a otežana je zbog nedostatka pouzdanih podataka o fondu građevina, što je ujedno i jedan od najvećih izazova projekta. Jedan od ciljeva projekta je formiranje baze koja će koristiti daljnjim aktivnostima sprječavanja katastrofa i ublažavanja posljedica. Postojanje odgovarajućih prostornih podataka je osnovni preduvjet za adekvatnu procjenu stanja, odnosno izloženosti određenog područja rizicima, kao i za izradu planova za prevenciju utjecaja rizika te određivanje prioritarnih aktivnosti u smislu jačanja kapaciteta i infrastrukture za odgovor na rizik. U ovom radu naglasak je stavljen na procjenu oštetljivosti armiranobetonskih zgrada na području gradske četvrti Trešnjevka – sjever kao jedne od najgušće naseljenih gradskih četvrti.

## 2 Područje studije

Grad Zagreb je kulturno, znanstveno, gospodarsko i upravno središte Republike Hrvatske. Nalazi se u kontinentalnoj središnjoj Hrvatskoj, u području podložnom potresima, na susretu tektonskih ploča. Prema prostornom rasporedu epicentara prošlih potresa definirano je nekoliko rasjeda (Slika 2.) koji se na dubini od 8 km spajaju s glavnom zonom te ih se svrstava u širu zonu Zagrebačkog rasjeda [6].



Slika 2. Epicentri potresa i sustav rasjeda na zagrebačkom području [6]



Područje Zagreba je prema dosadašnjoj procjeni pod umjerenim do visokim potresnim hazardom. Osim geografskog položaja, velike je izloženosti zbog guste naseljenosti, kulturnog naslijeđa i važnosti grada te je velike oštetljivosti zbog nepovoljne koncepcije nosivih konstrukcija za djelovanje potresa, starosti, lošeg održavanja, nezakonitih izvedbi i rekonstrukcija. Sve to ukazuje na veliki potresni rizik grada.

Kao ulazni podaci projekta "Potresni rizik Grada Zagreba", u ovom slučaju za područje gradske četvrti Trešnjevka – sjever, korišteni su kućni brojevi svih zgrada na promatranom području te digitalni katastarski plan koji sa svojim informacijama predstavlja lokacije svih građevina. Objedinjavanjem i spajanjem tih podataka u jedinstven set i bazu, dolazi se do ukupnog broja građevina na istraživanom području, bez obzira na namjenu. Baza podataka svih građevina u Gradu Zagrebu s njihovim karakteristikama (lokacija, položaj, tip zgrade, katastarska čestica, površina, katnost, nepravilnosti, itd.) predstavlja osnovnu podlogu za definiranje potresnog rizika Grada Zagreba.

## **2.1 Karakteristike zgrada gradske četvrti Trešnjevka - sjever**

Trešnjevka – sjever je visoko izgrađena gradska četvrt površine 5,81 km<sup>2</sup>. Jedna je od najgušće naseljenih gradskih četvrti što pokazuje popis iz 2011. godine koji broji 55 425 stanovnika na području te gradske četvrti. Proteže se zapadnim dijelom grada Zagreba i okružena je nekim glavnim prometnicama. Ima raznoliku arhitekturu, na istoku prevladavaju pravilni gradski blokovi, a na zapadu uske uličice s gusto naseljenim kućama. Pripada krugu izrazito ravničarskih gradskih četvrti, a sav prostor je već izgrađen. Između dva svjetska rata stihijski su građene većinom prizemnice, a u zadnjih 50 godina pojavile su se veće i višekatne stambene zgrade. Upravo su različite urbane karakteristike razlog odabira ovog područja Zagreba kao testnog za procjenu oštetljivosti. Izrađena je baza podataka građevina u Gradu Zagrebu s pripadajućim karakteristikama kao što su godina izgradnje, namjena, tip građevine, katnost, položaj i interakcija, nepravilnosti i slično. Baza podataka izrađena je u geografskom informacijskom sustavu (GIS) kojim se upravlja prostornim informacijama i njima pridruženim karakteristikama. Analizirane karakteristike prikazane su na slikama. U svim oznakama L, M, i H odnose se na broj katova.

Na području gradske četvrti Trešnjevka - sjever nalazi se više od 8000 stambenih zgrada, a obradom navedenih podataka došlo se do zaključka da je dominantan tip neomeđeno ziđe s krutom međukatnom konstrukcijom (URM\_S – 48,3%). (slika 3.)



Slika 3. Raspodjela građevina prema tipu na području gradske četvrti Trešnjevka - sjever

Slika 3. prikazuje raspodjelu građevina prema tipu, gdje su:

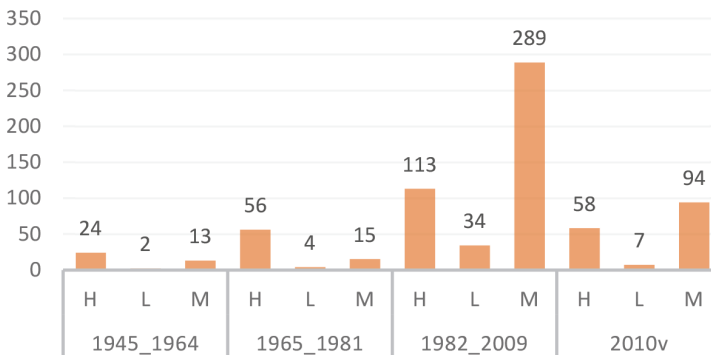
CM – omeđeno ziđe

RC2 – armiranobetonske konstrukcije

URM\_D – neomeđeno ziđe s drvenom međukatnom konstrukcijom

URM\_S – neomeđeno ziđe s krutom međukatnom konstrukcijom

U ovom istraživanju poseban naglasak stavljen je na armiranobetonske zgrade. Na promatranom području, od ukupnog broja stambenih zgrada, njih 709 izgrađeno je od armiranog betona, odnosno 8,6%. U nastavku je prikazana raspodjela armiranobetonskih zgrada na promatranom području prema razdoblju izgradnje i visinama (H – visoke zgrade, L – niske zgrade, M – srednje visoke zgrade) (slika 4.).



Slika 4. Prikaz raspodjele AB zgrada prema razdoblju izgradnje i visini

### 3 Metodologija proračuna

Kako bi se provela analiza oštetljivosti AB zgrada na području gradske četvrti Trešnjevka – sjever, prikupljeni su detaljni podaci o svakoj građevini te su analizirani unaprijed definirani atributi na temelju kojih se određuje oštetljivost upotrebom empirijske metode procjene oštetljivosti. Korištena je makroseizmička metoda u skladu s RISK-UE projektom [7], pri čemu se oštetljivost zgrade izražava indeksom oštetljivosti [8, 9]. Za svaki konstrukcijski sustav određen je indeks oštetljivosti  $V_I^z$  (1) kao što slijedi

$$V_I^z = V_I^c + \Delta V_m + \Delta V_R \quad (1)$$

$$\Delta V_m = \sum_{j=1}^n V_{m,j} \quad (2)$$

gdje su:

$V_I^c$  – osnovna (najvjerojatnija) vrijednost indeksa koja ovisi o konstrukcijskom sistemu [7, 8]

$\Delta V_m$  – modifikator ponašanja [7, 8] (2)

$V_{m,j}$  – modifikator za pojedine karakteristike zgrade

$\Delta V_R$  – utjecaj regionalne oštetljivosti; uzet je u obzir za pojedine zgrade kod kojih se postojećim indikatorima nisu mogli uzeti u obzir neki specifični nedostaci (kao što je nedostatak zidova u jednom smjeru) prema stručnoj procjeni.

Na temelju dobivenog indeksa  $i$  makroseizmičkog intenziteta potresa  $I$  izračunava se srednji razred oštećenja ( $0 < \mu_D < 5$ ) (3) prema izrazu:

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25V - 13.1}{Q} \right) \right] \quad (3)$$

pri čemu je  $Q$  indeks duktilnosti za koji je preporučena osnovna vrijednost za zgrade 2,3.

Vrijednosti srednjeg razreda oštećenja se zatim mogu povezati s najvjerojatnijom razinom oštećenja prema tablici 1.

Tablica 1. Razine oštećenja u ovisnosti o srednjem razredu oštećenja [10]

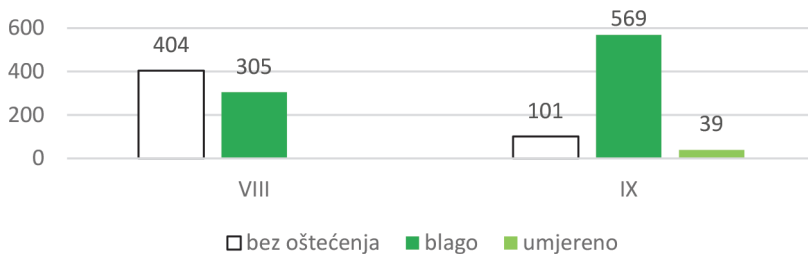
Intervali srednjeg razreda oštećenja	Najvjerojatnija razina oštećenja
0-0,5	bez oštećenja
0,5-1,5	blago
1,5-2,5	umjereno
2,5-3,5	znatno do teško
3,5-4,5	vrlo teško
4,5-5,0	potpuni slom

Očekivani najmanji i najveći stupnjevi oštećenja za armiranobetonske zgrade na području gradske četvrti Trešnjevka – sjever u ovisnosti o intenzitetu potresa iznose:

$$\text{VIII} \quad \mu_{D_{\min}} = 0,158, \mu_{D_{\max}} = 1,339$$

$$\text{IX} \quad \mu_{D_{\min}} = 0,361, \mu_{D_{\max}} = 2,330$$

Dobiveni rezultati pokazuju da bi za intenzitet potresa VIII, 404 zgrade bile bez oštećenja, a 305 bi imale blaga oštećenja, dok bi za intenzitet potresa IX, 101 zgrada bila bez oštećenja, 569 blago oštećene, a 39 umjerno. Za navedene intenzitete potresa ne bi trebalo biti teže oštećenih zgrada (slika 5.).



Slika 5. Raspodjela oštećenih AB zgrada prema stupnju oštećenja (EMS98) ovisno o intenzitetu potresa na području gradske četvrti Trešnjevka - sjever

## 4 Zaključak

Cilj istraživanja bio je procijeniti potresnu oštećljivost odabrane zagrebačke gradske četvrti. Trešnjevka – sjever izabrana je zbog svoje izgrađenosti i raznolikosti. Napravljena je baza podataka o građevinama na promatranom području te su u svrhu ovog rada analizirane armiranobetonske zgrade. Primjenom empirijske metode, odnosno makroseizmičkom metodom proračunat je indeks oštećljivosti koji ovisi o procijenjenoj vrijednosti indeksa oštećljivosti za određenu vrstu zgrada, regionalnom faktoru

oštećljivosti i modifikatorima ponašanja. Na temelju izračunatog indeksa oštećljivosti i predloženog indeksa duktilnosti, određen je srednji stupanj oštećenja za svaku zgradu pri različitim razinama potresnog intenziteta, u ovom slučaju VIII i IX. Srednji stupanj oštećenja usklađen je s najvjerojatnijom razinom oštećenja prema EMS-98. Utvrđeno je da bi armiranobetonske zgrade, koje čine 8,6% ukupnog broja zgrada na promatranom području, u najgorem slučaju trebale imati blaga oštećenja. Dosađajne predmetno istraživanje je početni korak za daljnji razvoj krivulja oštećljivosti, a kasnije i za procjenu rizika za cijeli Grad Zagreb.

## Literatura

- [1] Dasović I., Herak M., Prevolnik S.: Uvodno o potresu i njegovim učincima, Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Atalić, J., Todorčić, M., Uroš, M., Šavor Novak, M., Crnogorac, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Zagreb, pp. 13–36, 2021.
- [2] Atalić J., Hak S.: Procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj – rizik od potresa. Zagreb, 2014.
- [3] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Rizik od potresa za Hrvatsku: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjernicama za budućnost, GRAĐEVINAR 71 (2019) 10, pp. 923–947.
- [4] Erdik, M.: Earthquake risk assessment, Bulletin of Earthquake Engineering 15 (2017), pp. 5055–5092.
- [5] Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J.J., Restrepo-Vélez, L.F., Crowley, H.: Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. ISET Journal of Earthquake Technology 43 (2006) 3, pp. 75–104.
- [6] Kuk V., Prelogović E., Sović I., Kuk, K., Šariri, K.: Seizmološke i seizmotektonske značajke šireg zagrebačkog područja, GRAĐEVINAR 52 (2000) 11, pp. 647-653
- [7] Milutinović, Z.V., Trendafiloski, G.S.: RISK-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, WP4: Vulnerability of current buildings, 2003.
- [8] Giovinazzi, S., Lagomarsino, S.: A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, No. 896, 2004.
- [9] Lagomarsino, S., Giovinazzi, S.: Macroscopic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, Bulletin of Earthquake Engineering 4 (2006), pp. 415–443.
- [10] Lantada, N., Irizarry, J., Barbat, A.H., Goula, X., Roca, A., Susagna, T., Pujades, L. G.: Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method, Bulletin of Earthquake Engineering 8 (2010), pp. 201–229.

# An investigation of the influence of rigid underground building parts on the behavior of the structure during earthquakes

Thomas Holger Taetzsch, izv.prof.dr.sc. Josip Atalić

University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

thomas.holger.tatzsch@grad.unizg.hr, josip.atalic@grad.unizg.hr

## Abstract

Experiences from the 2020 earthquakes in Croatia point out the problem of different stiffness of the underground building parts and supporting systems. This relates to the effect of a rigid basement construction compared to a traditional masonry construction with wooden beams. In addition, the influence of neighboring underground buildings and the influence of interaction with the ground it will be analyzed. The topic has the specifics of building stock in Croatia and is hardly dealt with in existing research.

*Key words: underground buildings, behavior of structure, basement constructions, traditional masonry, wooden beams*

## Istraživanje utjecaja krutih podzemnih dijelova građevine na ponašanje konstrukcije tijekom potresa

### Sažetak

Iskustva potresa u Hrvatskoj u 2020. godini ukazuju problem različitih krutosti u nosivoj konstrukciji unutar iste zgrade. To se posebno odnosi na učinak krute podrumске konstrukcije u odnosu na tradicionalnu zidanu konstrukciju s drvenim gredama. Osim toga, analizirati će se utjecaj susjednih građevina i njihovih elemenata ispod zemlje te utjecaj interakcije s tlom. Navedena tema gotovo da nije obrađena u postojećim istraživanjima, odnosno nije poznata.

*Ključne riječi: podzemne građevine, ponašanje konstrukcije, podrumске konstrukcije, tradicionalno zidanje, drvene grede*

## 1 Introduction

Earthquake safety is an aspect that has been neglected in studies before 2020 earthquakes in Croatia and especially some specific topics like of different stiffness of the underground building parts and or other elements like interaction with the soil. 2020 earthquakes in Croatia point out influence of the subsoil on the stability of the buildings, especially when ground conditions could have changed like soil pressure on the construction parts, settlements or even earth movements [1–3]. Another aspect is the influence of and on the neighboring underground buildings. Changes to the supporting structure caused by earthquakes also affect the neighboring building, as well as changes to the subsoil due to settlement or sliding of the ground [4].

Stronger earthquakes lead to powerful wave movements inside the earth, which can then be felt on the earth's surface. The ground moves horizontally or vertically and with it everything that stands on it – including houses. However, most of the deaths in such disasters are not related to the earth movement per se but are the result of collapsing buildings. In very general terms, earthquake-proof construction therefore means constructing buildings in such a way that they “follow” the movements of the earth without collapsing [4, 5].

Analyzing different construction types of different influences are point out.

Wood in the structures is making them flexible or not as rigid as modern concrete structures, but it is important to point out that timber construction combined with masonry construction is traditional style. In modern architectural styles, there is usually no masonry or wooden construction in the basement or the foundations. Usually, wooden elements are used for roof structure and tends to be expensive, and recently concrete structures are usually business to constructions firms and usually quicker to make. They are many advantages of modern structures, like higher superstructure loads, for example on the upper floors, compared to traditional ones [5].

In this phase research is focused on two construction methods separately and comparing the advantages and disadvantages in the field of their application.

The examined buildings after the first and second earthquakes in Croatia showed the differences in the vulnerability of the building elements when are used elements of different stiffness. In contrast to rigid basements, masonry vaults or wooden beams were not fixed to the masonry in traditional basement buildings. In modern constructions this contact is compact, without leeway in the structural connections [2]. A specific topic of this research is the analysis of several structural systems after the Zagreb and Petrinja earthquakes, of buildings which have rigid underground parts and characteristic soil conditions. The buildings in aggregates or block are very poorly researched, particularly the influence of subterranean elements.

Research methodology and plan research would begin with a thorough collection of data on damages from recent earthquakes. The processed data are intended to identify the fundamental issues of structures in relation to earthquake safety and, in a broader sense, to make them recognizable. An analysis of data from earthquakes in neighboring countries such as Albania and Italy will be carried out. Experimental investigations are also planned in final phase, particularly on underground parts of the building [4–6].

## 2 Construction types of rigid underground buildings

### 2.1 Masonry-Timber construction (mixed construction)

First phase of the research is analysis of typology of different construction types. Mixed structures as a combination of components made of wood or wood-based materials, load-bearing or non-load bearing, with those made of modern materials are possible in various forms, one of the examples is shown in figure 1.

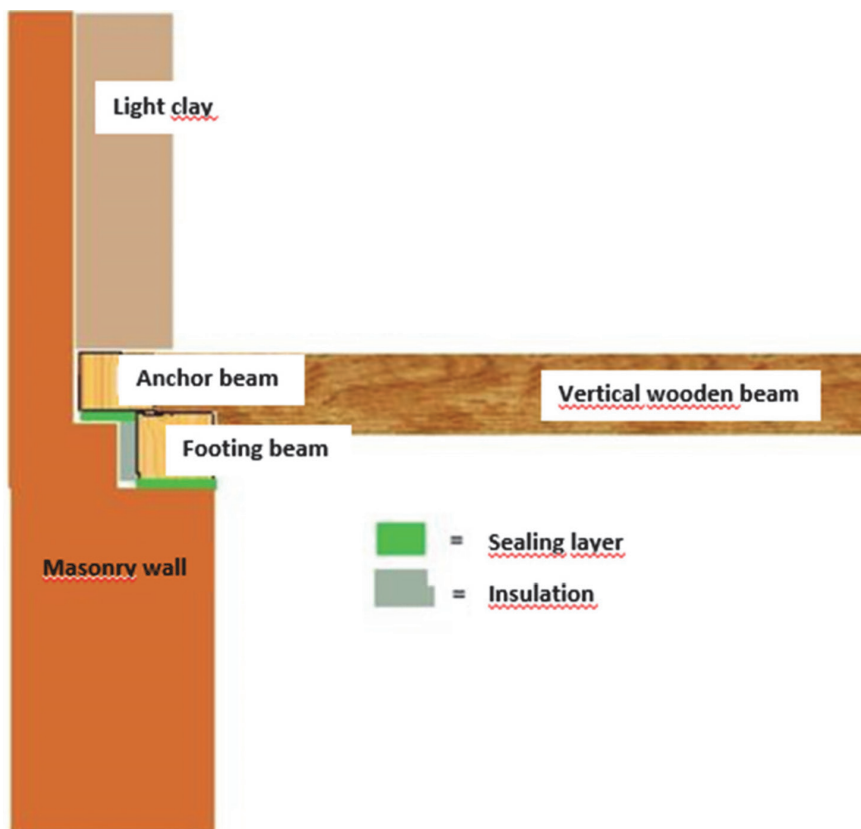


Figure 1. Support of an anchor beam



The most common form, a combination of components from modern building materials (hereinafter also called solid construction) with non-load bearing elements in timber construction (or others) is used in this publication presented systematically [7].

The wooden components are used inside load bearing system (especially for slabs or some unstructured elements) buildings but its stiffness is no match to the materials such as masonry, concrete or steel. This type of task sharing is most common in residential and implemented in administrative buildings. Furthermore, there are numerous possible applications for planners and builder's in new buildings [6].

Between handcrafted on-site buildings on the one hand and industrially manufactured systems with a high degree of prefabrication on the other hand, have a wide range. The wooden building originally corresponds to the manual form of carpentry production of the construction site while industrially prefabricated systems, for example, in the prefabricated house industry have been introduced for a long time. Also, for that solid construction – is still just a wide range between artisanal and industrialized to observe production [6–8].



**Figure 2. Traditional basement construction with masonry and wooden beams**

In the mixed construction method, two different trades come together, which in the here required shape not always on top of each other are recorded. This results in coordination tasks, from the dimensional tolerances to the scheduling. In the absence of comparable project developments with the same project partners, a corresponding positive build up experience. Also, on pages of architects and structural engineers are there so far, few offices that use a mixed construction foresee execution. Here like the reasons be like those already described above. Added comes even not the most executing companies have already gained experience and therefore demanding detailed planning is necessary, which – at least for each first projects planned in mixed construction – requires increased effort [4, 6].

Helmut Prion of the British Columbia University in Canada studied the earthquake resistance of timber structures using the January 1995 event in Kobe, Japan. Because wooden houses are more flexible than solid buildings, i.e., more likely to allow deformations without breaking, they are significantly more earthquake-proof. Above all, the North American lightweight frame construction is rated very well, a technology that is also being used increasingly in Switzerland. These wooden frames are prefabricated in the factory and often transported to the construction site together with the windows. Depending on the hazard, the frames can be additionally stiffened, even very inexpensively, with wire ropes. Such stiffened wooden frames correspond to the construction with shear walls - a construction style which is also in vogue.

Earthquakes cause rapid movements of the ground, with horizontal movements usually being stronger than vertical ones. Depending on the intensity of the earthquake and the construction method, a building is damaged to a greater or lesser extent. The design and appropriate structural measures can increase resistance of the structure.

Increased safety is by no means a question of cost. This is especially true for new buildings. Only several percent of the construction costs are to be reserved for measures to protect against earthquakes, i.e., 5, 000 to 10, 000 euros for a single-family house. In recovery phase, you cannot get the same safety for that amount of money. Complete reconstructions are therefore suitable where the measures are an integral part of the project. Which measures have a good cost-benefit ratio? Which construction is safe [2]?

Mixed construction methods as shown in figure 2 usually has lower safety. Our extensive investigations on earthquake-affected buildings in Zagreb and Petrinja mostly do poorly with mixed systems of wooden beams and masonry. The construction corresponds to the infilling of frames with bricks or sand-lime bricks. From a physical point of view, the infill would lose out of plane stability ("fall out") in the event of an earthquake [9, 10].

In general, massive buildings in Croatia usually be strengthened with reinforced concrete walls. Since the concrete parts are expensive, two smaller, floor-to-floor concrete walls are often integrated into the masonry - one wall part each in the two main directions. These stiffening concrete parts are often combined with the stairwell core [4].

## 2.2 Rigid basement construction

In multi-story buildings for residential use, basements are often erected with in-situ concrete, whereby for larger built-up areas the use of concrete formwork parts is more common. The bending stress due to earth pressure can be reduced by reinforcement of the outer walls as shown in figure 3. Older single-family house

construction, cast-in-place basement walls are used, which in general are made of unreinforced concrete (strength class C 8/10 to C 12/15). It should be noted that concrete of these strength classes is not waterproof and therefore it must be protected by a moisture seal in any case. By using suitable formwork systems, the formwork effort that is often critical for in-situ concrete construction can be significantly reduced [11–14].



**Figure 3. Commercial rigid basement construction**

As an alternative to traditional styles, methods of wall construction in the basement obtained floor-to-floor prefabricated parts are used more often in recent years. The prefabricated wall panels come with built-in frames and pre-attached ceiling elements in one trainload. This allows the working time on the construction site to be significantly reduced. At the base of the wall elements, the force is introduced into the positive connection found or into a reinforcement connection. The connection with the floor elements and the stiffening transverse walls is carried out via subsequently cast, reinforced gratings and butt joints. In single-family house construction, prefabricated basements, especially in combination with prefabricated houses, are increasing significantly [3, 4, 15].

Double walls are also being used since there is no need for formwork or connections of these elements among each other or of the elements with floor panels and furthermore, they are easier to make than precast walls. The wall elements consist of two, by factory-provided so-called lattice girders connected wall shells made of reinforced concrete.

The gap is filled with in-situ concrete - the construction then corresponds to a massive one-wall-construction. The “tanks” can also be made of lightweight concrete or fiber concrete. Some manufacturers offer the wall elements with an integrated thermal insulation. With double walls also so-called “white tanks” can be produced. A house that consists only of outer walls is more likely to deform when the earth moves horizontally than one that is braced by intermediate walls. Bracing walls that run over several stories are ideal. On the other hand, asymmetrical, staggered wall arrangements should be avoided. A core of reinforced concrete also increases rigidity. In terms of planning, for example, it can be easily combined with a stairwell or an elevator shaft [4, 16].

In Figure 4 we can see, the basement floor serves in contrast to other floors not only as the derivation of building loads, but also for the support of basement walls against soil pressure. The following systems are therefore possible:

- large format prefabricated parts with disc effect
- precast floors with topping
- in-situ concrete slabs

The strength of the soffit for residential building for tract depths are on average set at  $1/25$  of the span [17, 18].

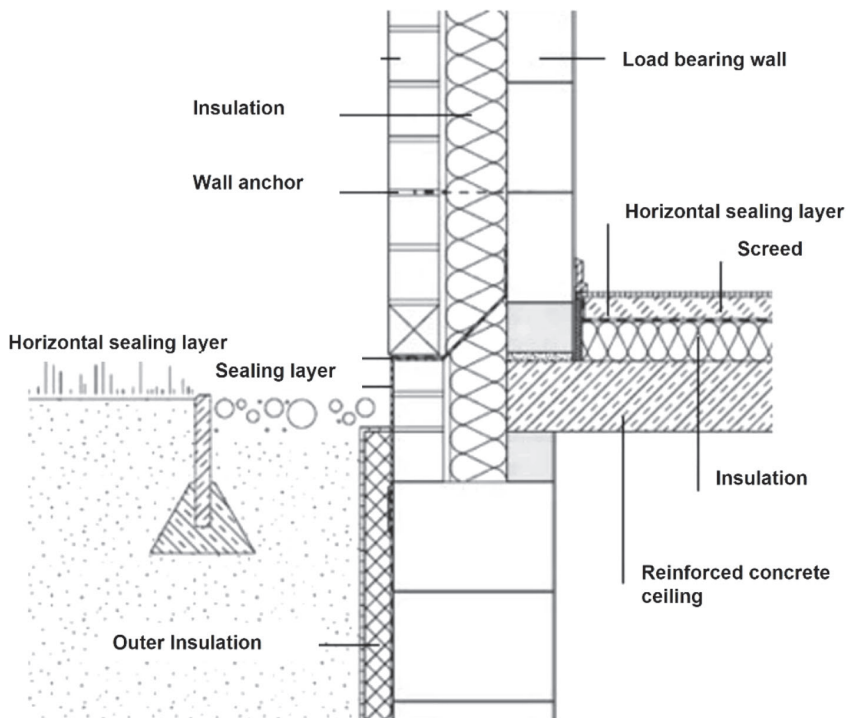


Figure 4. Outer rigid basement ceiling construction

### 3 Conclusion

Stiffness is a measure of how much force is required to displace a building by a certain amount. If it requires more force to shift a building than another building, we will say that the one building is stiffer. Stiffness can be advantageous with respect to earthquake damage because it can limit the deformation demands on a building. A structure that is too stiff (often referred to as brittle) will be prone to failure under relatively small deformation demands. An example of a brittle structure is an unreinforced masonry building, which will tolerate very little displacement before the onset of damage and failure [4, 18].

The structural system of the basement construction is generally different, in a way that leads to a significant increase in the stiffness of the basement lateral load resistant system. To understand the impact of this change of stiffness on the seismic behavior we separated the structures as shown before and classified them out of the parametric data that was collected in the field.

Croatia launched an intervention service of civil engineers, architects and geotechnicians for the earthquake in 2020 – HCPI – called Croatian center of earthquake engineering – this intervention team helped to record building damages as quickly as possible. There were about 1400 engineers volunteered.

There were around 50.000 buildings examined by HCPI engineers after the earthquake in Petrinja. The engineers collected a lot of data by putting them in a system to have the possibility to compare them or count out necessary data for research threats. We extract the data and search for typical damages on the different basement construction types, which were found in the earthquake areas [8, 10].

The data sheets show us that many of them have no basement or similar underground constructions, buildings with partial basements are mentioned as buildings with basement.

From the earthquake of 2020 in Petrinja as shown in table 1 are 49170 buildings with documented damages, most damages, about 33065, were classified with “green” – EMS I, 10737, classified with “yellow” EMS II - III and 5368 in “red” EMS IV -V classification.

Out of these were 9436 buildings with a basement construction, 6546 “green” EMS I, 2147 “yellow” EMS II - III and 743 “red” EMS IV - V classified. 22970 buildings either has a basement construction there were classified 15449 “green” EMS I, 4920 “yellow” EMS II - III and 2601 “red” EMS IV - V classified.

**Table 1. Data from Petrinja earthquake 2020**

	<b>Amount</b>	<b>Green EMS I</b>	<b>Yellow EMS II - III</b>	<b>Red EMS IV - V</b>
Damaged buildings	49170	33065	10737	5368
Damaged buildings with basement	9436	6546	2147	743
Damaged buildings without basement	22970	15449	4920	2601

The difference of the amount numbers of damaged buildings in comparison to buildings with or without basement is developed by missing input data while the intervention time of the earthquake in 2020, there were a lot of specialists and not so much time to take care of all data selecting in the system, which means about 35 % of the total.

From this data we can conclude that in total 46 % of all the damaged buildings are constructed without basement, only 19 % are constructed with basement structures.

Houses with a simple structure that is as symmetrical as possible and a low center of gravity, i.e., basement constructions, are much more quake-proof than tall constructions and constructions with nested floor plans such as U or T shapes.

A high rigidity of the structures is also important. A house that consists only of outer walls is more likely to deform when the earth moves horizontally than one that is braced by intermediate walls. Bracing walls that run over several storeys are ideal. On the other hand, asymmetrical, staggered wall arrangements should be avoided. A core of reinforced concrete also increases rigidity [4, 8, 19].

In the case of multi-story buildings, attention should also be paid to uniform rigidity and mass distribution. If stiff and rather “soft” storeys alternate in a house, this reduces earthquake safety. Bullets of different weights also have a negative effect on the vibration behavior. Above all, it should be avoided that the higher storeys are heavier than those below.

Large spaces are often designed on the ground floor – living rooms and representative rooms. Significantly more partitions are installed on the upper floors, which stiffen a bit the building. However, this results in a weak story inside stiff boxes. This Described typology is especially used in newer single-family homes.

High rigidity does not necessarily mean that heavy building materials are to be preferred. The relatively light building material wood is, for example, quite suitable for earthquake-proof construction. Buildings in modern timber frame construction as well as old half-timbered houses can withstand relatively high vibrations without collapsing – if they have a rather square floor plan. Of course, heavy buildings made of concrete or bricks do not vibrate as quickly. But if this happens, then significantly

larger inertial forces are involved. If no further protective measures are taken, such buildings in particular can sometimes collapse without prior notice in the event of a severe earthquake [2, 16, 18, 19].

## Literature

- [1] Das BM. Advanced Soil Mechanics, Fifth Edition. 5. Aufl. London: CRC Press; 2019. 734 S.
- [2] Nur T. Seismology, Earthquake Engineering and Structural Engineering. Arcler Press; 2018. 279 S.
- [3] Mamlouk M, Zaniewski J. Materials for Civil and Construction Engineers. 4. Aufl. Hoboken: Pearson; 2016. 672 S.
- [4] Wang A. Civil Engineering: Design, Construction and Maintenance of Buildings. New York: Larsen and Keller Education; 2020. 216 S.
- [5] Price DG. Engineering Geology. Berlin, Heidelberg: Springer; 2009.
- [6] Construction AI of T. Timber Construction Manual. 6. Aufl. Linville JD, Herausgeber. Hoboken: Wiley; 2012. 672 S.
- [7] Lenze W. Fachwerkhäuser restaurieren - sanieren - modernisieren: Materialien und Verfahren für eine dauerhafte Instandsetzung. 10., erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag; 2016. 265 S.
- [8] Gupta SP, Gupta SS. Civil Engineering Through Objective Type Questions 4th Ed. Forth edition. CBS Publishers and Distributors Pvt. Ltd.; 2023. 682 S.
- [9] Broschu-re-Risse-in-Gebaeuden-web.pdf [Internet]. [zitiert 14. Mai 2023]. Verfügbar unter: [https://www.offenbach.de/medien/bindata/of/Umwelt\\_Klima/Broschu-re-Risse-in-Gebaeuden-web.pdf](https://www.offenbach.de/medien/bindata/of/Umwelt_Klima/Broschu-re-Risse-in-Gebaeuden-web.pdf)
- [10] Attewell PB, Farmer IW. Principles of Engineering Geology. Dordrecht: Springer Netherlands; 1976.
- [11] Knutson K, Schexnayder C, Fiori C, Mayo R. Construction Management Fundamentals. 2. Aufl. Boston: McGraw Hill; 2008. 720 S.
- [12] Sobon JA, Schroeder R. Timber Frame Construction: All About Post-and-Beam Building. Pownal, Vt: Storey Publishing, LLC; 1984. 208 S.
- [13] Timoshenko SP, Gere JM. Theory of Elastic Stability. 2. Aufl. Mineola, N.Y: Dover Publications Inc.; 2009. 541 S.
- [14] Fundamente\_Keller.pdf [Internet]. [zitiert 14. Mai 2023]. Verfügbar unter: [https://www.bauberufe.eu/images/doks/Fundamente\\_Keller.pdf](https://www.bauberufe.eu/images/doks/Fundamente_Keller.pdf)

## Procjena oštećljivosti zidanih zgrada u gradu Zagrebu

Ivan Kosalec<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Josip Atalić<sup>2</sup>, izv. prof. dr. sc. Marta Šavor Novak<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, antonija.ivan.kosalec@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, josip.atalic@grad.unizg.hr

<sup>3</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marta.savor.novak@grad.unizg.hr

### Sažetak

Procjenom potresnog rizika utvrđuje se vjerojatnost oštećenja izgrađenog okoliša, gubitak ljudskih života te ekonomski gubici u vezi sa seizmičkim događajem. Faktori koji utječu na procjenu rizika od potresa su seizmička opasnost, izloženost izgrađenog okoliša te fizička oštećljivost građevina. Fokus ovoga rada će biti na fizičkoj oštećljivosti zidanih zgrada na području gradske četvrti Trešnjevke sjever koji odlikuju raznolika arhitektura većinski zidanih građevina. Primjenom makroseizmičke metode određen je srednji stupanj oštećenja za potrese intenziteta VIII i IX za zidane građevine.

*Ključne riječi: procjena rizika od potresa, oštećljivosti, zidane zgrade, makroseizmička metoda, baza podataka*

## Vulnerability assessment of masonry buildings in the city of Zagreb

### Abstract

Seismic risk assessment determines the probability of damage to the built environment, loss of human life and economic losses related to a seismic event. Factors influencing the assessment of earthquake risk are seismic hazard, exposure of the built environment and physical vulnerability of buildings. The focus of this work will be on the physical vulnerability of masonry buildings in one of the Zagreb districts, which is characterized by diverse architecture of mostly masonry buildings. Using the macroseismic method, the mean damage grade of masonry buildings for earthquakes of macroseismic intensity VIII and IX is determined.

*Key words: earthquake risk assessment, vulnerability, masonry buildings, macroseismic method, database*



## 1 Uvod

Potres je prirodna katastrofa koja se može dogoditi u bilo kojem trenutku diljem Zemlje, ali ju je nemoguće predvidjeti i spriječiti. Najčešće se definira kao iznenađeno oslobađanje nakupljene elastične potencijalne energije u zemljinoj kori u obliku seizmičkih valova i topline koja se dogodi na nekom ograničenom području[1].

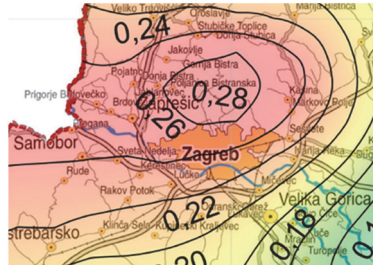
Rizik od potresa najčešće se definira kao kombinacija vjerojatnosti pojave nekog događaja i njegova posljedica [2]. Procjenom rizika se utvrđuje vjerojatnost oštećenja zgrada i infrastrukture te posljedično tome ljudske žrtve i ekonomski gubici u vezi sa seizmičkim događajem[3]. Pristupanjem Europskoj uniji Hrvatska je preuzela mnoge obveze što je uključivalo i obveze iz područja upravljanja rizicima od katastrofa. Rad na procjenama rizika od potresa u Hrvatskoj nije započeo zahtjevima Europske komisije, ali činjenica je da se, za razliku od ostalih ugroženih država u Europi, njime bavilo periodički i nesustavno, što je predstavljalo veliki problem u radu na procjenama [4].

Procjena rizika sastoji se od tri glavna parametra ( Slika1.) a to su seizmički hazard, izloženost izgrađenog okoliša te fizička oštetljivost pojedinih tipova građevina. Od navedenih parametara seizmički hazard je jedini na koji ne možemo utjecati dok se za ostala dva posljedica potresa mogu ublažiti.



Slika 1. Faktori koji utječu na rizik od potresa [5]

Seizmički hazard ili potresna opasnost su potencijalno razorni učinci potresa na promatranoj lokaciji[6]. To su statističke vjerojatnosti premašivanja odabranog parametra (najčešće vršno ubrzanje tla) u odabranom razdoblju. Na području Republike Hrvatske seizmički hazard je definiran kartom potresnih područja, izrađenom od strane Geofizičkog odsjeka PMF sveučilišta u Zagrebu, [7] prema kojoj se na promatranom području Zagreba očekuju vršna ubrzanja tla od 0,20-0,28 g za povratno razdoblje od 475 godina (Slika2.). Iako seizmičko mikrozoniranje nije provelo na području cijelog Zagreba može se pretpostaviti da većina tala odgovara tipu B ili C prema klasifikaciji u skladu s normom za projektiranje potresne otpornosti[5].



Slika 2. Karta potresnih područja Grada Zagreba [7]

Uz seizmički hazard bitnu komponentu procjene rizika na određenoj lokaciji čine značajke zgrada i ostale infrastrukture. Najvažniji dio podataka o izloženosti odnosi se na bazu podataka o postojećim građevinama (fond), jer oštećenje ili uništenje građevina prilikom djelovanja potresa značajno doprinosi društvenom i ekonomskom riziku[8]. Fond zgrada uobičajeno se opisuje odabranom taksonomijom pomoću koje se pojedini atributi (primjerice godina izgradnje, materijal, konstrukcijski sustav, dimenzije, visina, katnost, pozicija u bloku, zaposjednutost i drugo) obuhvaćaju na ujednačen način, tako da se može provesti jednoznačna klasifikacija, jer se procjene rizika rade na “gruboj rezoluciji”. U Hrvatskoj ne postoje popisi odnosno baze podataka o zgradama, već se u popisima stanovništva prikupljaju samo podaci koji se vežu na stambene jedinice [5]. Pošto se taksonomija specifičnih tipologija gradnje razlikuje ovisno o promatranom području izrazito je bitno razviti primjenjiv sustava za pouzdaniju procjenu rizika.

Fokus ovoga rada je na fizičkoj oštećljivosti zidanih zgrada u Gradu Zagrebu na području gradske četvrti Trešnjevke sjever kao testnog područja. Seizmička oštećljivost građevine može se opisati kao njezina osjetljivost na oštećenje uslijed podrhtavanja tla određenog intenziteta. Cilj njene procjene je odrediti vjerojatnost pojave određenih razina oštećenja kod promatranih tipova građevina uslijed djelovanja potresa. U suvremenim procjenama rizika najčešće se razina fizičke oštećljivosti građevina opisuje pomoću krivulja oštećljivosti, često definiranih kao vjerojatnost gubitaka za određenu razinu djelovanja potresa, i/ili pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja često zvanih krivulje ranjivosti. koje označuju vjerojatnost prekoračenja određenih graničnih stanja, npr. fizičkih oštećenja, za određenu razinu djelovanja potresa[5]. Metode za procjenu oštećljivosti se dijele u dvije glavne metode, empirijsku i analitičku te na njihovu kombinaciju hibridne metode. Najčešće je korištena EMS98 ljestvica (slika 3.) s kategorijama oštećenja od I do V [9], pri čemu se vrlo grubo definiraju oštećenja konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata te opasnosti za sigurnost korisnika.

Kategorizacija	I	II	III	IV	V
	Blago oštećenje	Umjereno oštećenje	Značajno oštećenje	Vrlo teško oštećenje	Otkazivanje
AB					
zidane					
opis	zanemarivo konstrukcijsko oštećenje i blago nekonstrukcijsko oštećenje	blago konstrukcijsko oštećenje i umjereno nekonstrukcijsko oštećenje	umjereno konstrukcijsko oštećenje i teško nekonstrukcijsko oštećenje	teško konstrukcijsko oštećenje i vrlo teško nekonstrukcijsko oštećenje	vrlo teško konstrukcijsko oštećenje

Slika 3. Kategorija oštećenja prema EMS98 ljestvici

U empirijskim postupcima često se upotrebljavaju ljestvice (tablice, matrice i slično) oštećenja temeljene na statističkim podacima raspoloživim zahvaljujući pregledima i istražnim radovima nakon razornih potresa. U analitičkim postupcima ljestvica oštećenja se odnosi na mehanička svojstva povezana s graničnim stanjima zgrada (primjerice kapacitet međukatnog pomaka), polazeći od numeričkih modela za simulaciju seizmičkog odziva konstrukcija na povećane razine gibanja temeljnog tla[4].

## 2 Predmetno područje studije

U ovom radu će fokus biti stavljen na područje Trešnjevke sjever kao druge najgušće naseljene četvrti u Zagrebu (52 974 stanovnika na 5,81 km<sup>2</sup>) i reprezentativan fond građevina. Trešnjevka se proteže na zapadnom dijelu grada, omeđenim sa Zagrebačkom cestom na zapadu te Savskom cestom na istoku te željezničkom prugom Zagreb-Ljubljana na sjeveru i Ljubljanskom avenijom na istoku[10]. Na području Trešnjevke-sjever prema dostupnim podacima nalazi se 8269 stambenih zgrada od kojih je zidanih 7560. Zidane konstrukcije su podijeljene u tri glavna tipa od kojih omeđeno ziđe sa krutom stropnom konstrukcijom (CM) čini 18,4% udjela u ukupnom djelu građevina. Neomeđeno ziđe s krutom stropnom konstrukcijom (URM\_S) je dominantno sa 48,3% udjela te neomeđeno ziđe s drvenom stropnom konstrukcijom (URM\_D) kojeg ima 24,8% (slika 4.).



Slika 4. Trešnjevka sjever s udjelima tipova zgrada

### 3 Metodologija proračuna

Za provedbu analize oštećljivosti zidanih zgrada prvo su prikupljeni detaljni podaci iz postojeće baze i arhiva, obilaskom inženjera na terenu, koristeći Google street view te podacima iz multisenzorske snimke grada Zagreba. Zatim su definirani atributi koji će se analizirati i na temelju kojih će se odrediti oštećljivost upotrebom empirijske metode procjene oštećljivosti. Korištena je makroseizmička metoda u skladu s RISK-UE projektom[11], pri čemu se oštećljivost zgrade izražava indeksom oštećljivost[12, 13]. Za svaki konstrukcijski sustav određen je indeks oštećljivosti  $V_I^z(1)$  kao zbroj osnovne (najvjerojatnije) vrijednosti indeksa  $V_I^c$  koja ovisi o konstrukcijskom sistemu i modifikatora ponašanja  $\Delta V_m(2)$ . Utjecaj regionalne oštećljivosti nekog tipa  $\Delta V_R$  je uzet u obzir za pojedine zgrade kod kojih se postojećim indikatorima nisu mogli uzeti u obzir neki specifični nedostaci (kao što je nedostatak zidova u jednom smjeru) prema stručnoj procjeni.

$$V_I^z = V_I^c + \Delta V_m + \Delta V_R \quad (1)$$

gdje je:

$V_I^c$  – najvjerojatnija vrijednost indeksa oštećljivosti nekog tipa zgrada

$\Delta V_R$  – regionalni faktor oštećljivosti

$\Delta V_m$  – modifikator ponašanja.

$$\Delta V_m = \sum_{j=1}^n V_{m,j} \quad (2)$$

gdje je:

$\Delta V_m$  – modifikator ponašanja zgrade

$V_{m,j}$  – modifikator za pojedine karakteristike zgrade.

Na temelju dobivenog indeksa i makroseizmičkog intenziteta potresa  $I$  izračunava se srednji razred oštećenja (3) ( $0 < \mu_D < 5$ ) prema izrazu:

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25V - 13.1}{Q} \right) \right] \quad (3)$$

gdje su:

$I$  - potresna opasnost definirana u smislu makroseizmičkog intenziteta

$V$  - indeks oštetljivosti

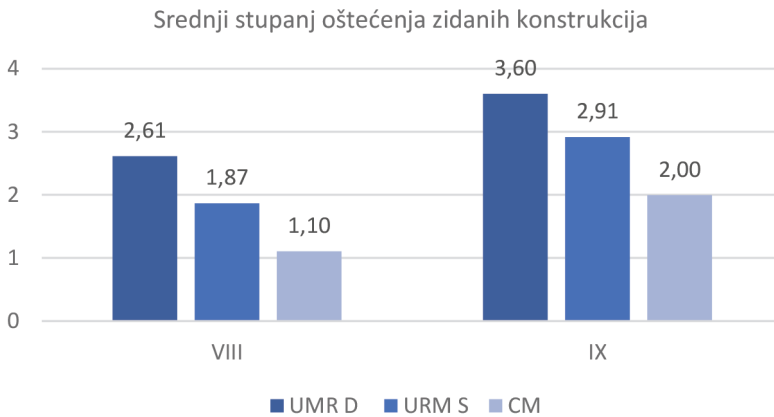
$Q$  - indeks duktilnosti koji opisuje duktilnost određenog konstrukcijskog tipa.

Vrijednosti srednjeg razreda oštećenja zatim se mogu povezati sa najvjerojatnijom razinom oštećenja prema EMS-98 (tablica 1).

**Tablica 1. Stanja oštećenja za srednji stupanj oštećenja [14]**

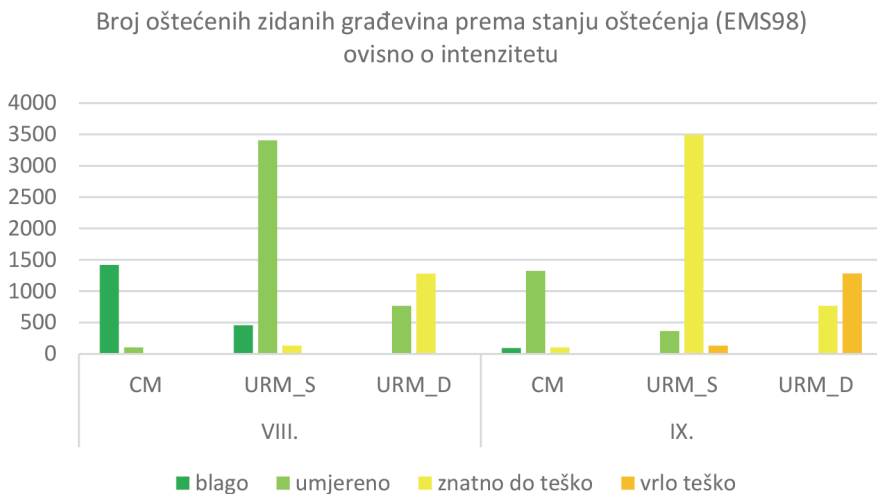
Intervali srednjeg razreda oštećenja	Najvjerojatnija razina oštećenja	Stupanj oštećenja prema EMS-98
0-0,5	bez oštećenja	D0
0,5-1,5	blago	D1 (stanje 1)
1,5-2,5	umjereno	D2 (stanje 2)
2,5-3,5	znatno do teško	D3 (stanje 3)
3,5-4,5	vrlo teško	D4 (stanje 4)
4,5-5,0	potpuni slom	D5 (stanje 5)

Za proračun srednjeg stupnja oštećenja korišteni su intenziteti potresa VIII i IX. Pri tome su dobivene prosječne vrijednosti za svaki tip građevine (slika 5.). Kao što je očekivano najvjerojatniji srednji stupanj oštećenja raste sa slabijom kvalitetom gradnje.



Slika 5. Srednji stupanj oštećenja 3 glavna tipa građevina za intenzitet VIII i IX

Prema određenim srednjim razinama oštećenja građevina u korelaciji s brojem građevina dobiveni su rezultati prikazani u sljedećoj tablici (slika 6.). Analizom se može zaključiti da bi prevladavalo umjereno oštećenje pri intenzitetu potresa VIII, dok bi za intenzitet IX dominantna razina oštećenja bila znatna do teška.



Slika 6. Broj oštećenih zidanih građevina prema EMS-98

## 4 Zaključak

Cilj istraživanja je provesti inicijalnu procjenu oštećljivosti zidanih zgrada na području grada Zagreba pri čemu se još uvijek radi na stvaranju kompletnije baze. Stoga je odabran kvart Trešnjevka sjever čijem području su svi atributi već uneseni a posebice zanimljiv je zbog svoje raznolike izgrađenosti. Primjenom empirijske, makroekonomičke metode proračunat je indeks oštećljivosti stambenih zgrada te je određen srednji stupanj oštećenja za potresne intenzitete VIII i IX. Srednji stupanj oštećenja usklađen je s najvjerojatnijom razinom oštećenja prema EMS-98. Srednji stupanj oštećenja građevina tipa CM je za potres intenziteta VIII blag dok za intenzitet IX raste srednja razina oštećenja na umjereno. Za URM\_S pri intenzitetu VIII spada u umjereno dok za intenzitet IX raste na znatno do teško. Kao što je očekivano najveća oštećenja očekuju se kod URM\_D gdje je najvjerojatnija razina oštećenja raste sa znatno do teško za VIII na vrlo teško za IX intenzitet. Dobiveni rezultati predstavljaju inicijalnu procjenu oštećljivosti zidanih zgrada u testnom području, a u sljedećoj fazi istraživanja će se oštećljivost definirati pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja i krivulja oštećljivosti. Nakon što se model oštećljivosti validira na testnom području, pristupit će se razvoju modela oštećljivosti i rizika za cijeli grad.

## Literatura

- [1] Dasović I, Herak M, Pervolnik S. Uvodno o potresu i njegovim učincima. In: Uroš M, Todorić M, Crnogorac M, et al. (eds) Potresno inženjerstvo-obnova zidanih zgrada. Zagreb, 2012, pp. 13–36.
- [2] Hadzima-Nyarko M, Šipoš TK. Insights from existing earthquake loss assessment research in Croatia ReCoTiP Development of Reinforced Concrete Elements and Systems with Waste Tire Powder View project. Earthquakes and Structures 2017; 13: 401–411.
- [3] Calvi GM, Pinho R, Magenes G, et al. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years Thyspunt SSHAC Level 3 PSHA View project, <https://www.researchgate.net/publication/241826044> (2006).
- [4] Atalić J, Novak MŠ, Uroš M. Seismic risk for Croatia: Overview of research activities and present assessments with guidelines for the future. Gradjevinar 2019; 71: 923–947.
- [5] Šavor Novak M, Atalić J, Uroš M, et al. Rizik od potresa u Gradu Zagrebu. In: Uroš M, Todorić M, Crnogorac Mi, et al. (eds) Potresno inženjerstvo-obnova zidanih zgrada. Zagreb, 2021, pp. 37–45.
- [6] Crowley H, Bommer JJ. Modelling seismic hazard in earthquake loss models with spatially distributed exposure. Bulletin of Earthquake Engineering 2006; 4: 249–273.

- [7] Herak M, Allegretti I, Herak D, et al. Seismic hazard map. Republika Hrvatska.
- [8] Foulser-Piggott R, Crowley H. The European building stock inventory: creating and validating a uniform database for earthquake risk modelling Project: In-situ measurement of environmental vibrations induced by high-speed trains and mitigation of structural vibrations View project Robin Spence Cambridge Architectural Research, <https://www.researchgate.net/publication/256487119> (2012).
- [9] Grünthal G. European Macroseismic Scale 1998. 1998.
- [10] <https://aktivnosti.zagreb.hr/tresnjevka-sjever/155>.
- [11] Milutinovic Z V, Trendafiloski GS. RISK-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns WP4: Vulnerability of current buildings. 2003.
- [12] Lagomarsino S, Giovinazzi S. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. Bulletin of Earthquake Engineering 2006; 4: 415–443.
- [13] Giovinazzi S, Lagomarsino S. 3 th World Conference on Earthquake Engineering A MACROSEISMIC METHOD FOR THE VULNERABILITY ASSESSMENT OF BUILDINGS.
- [14] Lantada N, Irizarry J, Barbat AH, et al. Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. Bulletin of Earthquake Engineering 2010; 8, pp. 201–229.





# Seismic vulnerability of vernacular heritage masonry churches in continental Croatia – framework proposal

David Anđić<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Mislav Stepinac<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Studio Arhing d.o.o., david.andjic@yahoo.com

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, mislav.stepinac@grad.unizg.hr

## Abstract

After two recent earthquakes in Croatia in 2020, 442 individual immovable cultural assets were damaged, including 124 cultural heritage buildings that suffered severe structural damage. Most of the cultural heritage buildings are churches and chapels. Recognizing the significance of these cultural landmarks, there is a pressing need to conduct comprehensive research focusing on damage classification, condition assessment, and seismic vulnerability analysis. The primary objective of this research is to develop a robust framework for evaluating the seismic vulnerability of vernacular masonry churches.

*Key words: damage classification, ems 98, fragility, assessment*

## Seizmička ranjivost tradicijskih zidanih crkava u kontinentalnoj hrvatskoj – prijedlog metodologije

### Sažetak

Nakon dva nedavna potresa u Hrvatskoj 2020. godine oštećena su 442 pojedinačna nepokretna kulturna dobra, uključujući 124 građevine kulturne baštine koje su pretrpjele teška konstruktivna oštećenja. Većina građevina kulturne baštine su crkve i kapelice. S obzirom na značaj ovih kulturnih znamenitosti, postoji hitna potreba za provođenjem sveobuhvatnog istraživanja s fokusom na klasifikaciju oštećenja, procjenu stanja i analizu seizmičke ranjivosti. Primarni cilj ovog istraživanja je razviti robustan okvir za procjenu seizmičke ranjivosti vernakularnih zidanih crkava.

*Ključne riječi: klasifikacija oštećenja, ems 98, fragilnost, procjena*

## 1 Introduction

After the earthquake in Zagreb in March 2020, Croatia was again hit by a destructive 6.2 magnitude earthquake in December 2020. Area around Petrinja in Sisak-Moslavina County suffered the most severe consequences. According to the Croatian Center for Earthquake Engineering (HCPI - in Croatian), around 57 000 buildings were damaged [1]. Architectural heritage in the aforementioned area is marked by the characteristics of a militarized frontier under the Habsburg monarchy. Sisak-Moslavina County is characterized by small historical settlements with significant parish churches, chapels and isolated noble residences with palaces. In Sisak-Moslavina County alone, 308 immovable cultural assets with 4,416 houses in cultural and historical areas were damaged. According to the data of the World Bank report and HCPI, 206 religious buildings were damaged by the earthquake, 52 were partially collapsed or demolished. Most churches suffered severe damage to the load-bearing walls, vaults, arches and bell towers, affecting the overall stability of the buildings. Several churches had portions of the building collapsed, usually the bell tower, roof, vaults, and portions of the perimeter walls. The degree and severity of damage were classified according to EMS -98 [2]. In February 2021, the new law on the reconstruction of earthquake-damaged buildings in the city of Zagreb, the counties of Krapina-Zagorje, Zagreb, Sisak-Moslavina and Karlovac was enacted. The Law and Amendment to the Technical Regulation for Building Structures (Official Gazette 75/2020) defines four different levels of reconstruction of earthquake-damaged structures in terms of mechanical resistance and stability achieved. In this paper a research framework for 16 churches is presented. The focus of the study is on the condition assessment procedures and deriving vulnerability curves using earthquake damage data.

## 2 Steps in the retrofitting process

After an earthquake or another disaster, a series of activities follows. Based on the experience in the recent earthquakes in Croatia, steps/events in the post-earthquake retrofitting process are:

- Earthquake (or another disaster)
- Rapid assessment of building(s)
- Urgent measures
- Assessment with investigative works
- Retrofitting project / design
- Construction / Execution works and supervision
- Monitoring and maintenance (facility management).

Immediately after the earthquake, first rapid assessments have to be done to estimate the damage. Rapid assessments are done by on-field engineers and can be followed by newer technologies such as unmanned aerial vehicles (UAV). During the rapid assessment, the need for urgent measures is decided and urgent measures follow as soon as possible. Next step is assessment with investigative works. This step is an integral part for all the following activities and retrofitting strategies. Assessment with investigative works consists of several sub-steps:

- Brief visual inspection - it plays a crucial role in identifying visible signs of damage, such as cracks, displacements, and failures, which provide initial indications of structural integrity. However, it is important to supplement this visual inspection with more detailed investigations
- Gathering and studying the existing blueprints, archival documentation, and sketches of the buildings (churches) and their conservation studies
- Investigation works plan (non-destructive, semi-destructive, destructive tests)
- Investigation works execution
- Digitalization and documentation by i.e. laser scanning and/or photogrammetry (data about geometry, possible faults and cracks and earthquake damages, documentation of the heritage values of each individual building)
- Thorough visual inspection
- Building a BIM model of the actual existing building
- Structural modelling and analysis based on gathered data based on previous steps
- Retrofitting proposal.

Retrofitting project / design follows the retrofitting proposal. Next step is construction phase with supervision. It is of utmost importance to include the retrofitting project structural engineer during the construction phase as a supervisor. Their presence ensures that the retrofitting measures are implemented accurately and in accordance with the design specifications. To ensure the long-term effectiveness of the retrofitting efforts, it is essential to establish monitoring activities that can be either continuous or periodic. These activities help in assessing the performance of the retrofitted structure over time, detecting any potential issues or weaknesses, and taking timely corrective measures, if needed. Furthermore, proper facility management should be implemented to ensure regular maintenance and upkeep of the retrofitted building. In the following section, a research framework is proposed. This framework aims to provide methodologies for effectively assessing the performance of damaged and retrofitted structures.

### 3 Proposed research framework

As a part of the post earthquake retrofitting process, a research framework is proposed. The emphasis of the research would be on damage classification [3], condition assessment and seismic vulnerability of the existing vernacular masonry churches [4]. Vernacular masonry churches refer to religious structures that are constructed using local, indigenous materials and traditional building techniques, reflecting the architectural style and cultural heritage of a particular region or community. These churches often showcase the craftsmanship and ingenuity of local artisans, incorporating regional materials such as stone, brick, or timber into their construction. The design and construction of vernacular masonry churches are deeply rooted in the cultural and historical context of the area, representing the traditions, beliefs, and artistic expressions of the community. Vernacular masonry churches are not only significant from a religious perspective but also hold immense value as tangible representations of a community's identity, history, and architectural heritage. Preserving and protecting these structures is essential for safeguarding cultural diversity and promoting an appreciation for traditional building practices. Many vernacular masonry churches were built before modern seismic design principles were established. As a result, they may not have been specifically designed to withstand the seismic forces. The main structural elements of these churches are typically masonry walls, which can be prone to damage or collapse during seismic events. Almost all of them have undergone natural deterioration over time. Aging materials, weakened mortar joints, and previous structural damage can decrease their overall resilience and increase the risk of further damage during an earthquake. Addressing these earthquake-related challenges requires a comprehensive approach that includes seismic vulnerability assessments, retrofitting measures, and preservation efforts. By implementing appropriate retrofitting techniques, such as reinforcing masonry walls, improving connections, and strengthening architectural features, the seismic resilience of vernacular masonry churches can be significantly enhanced, ensuring their preservation and continued cultural significance.

Sixteen churches (Figure 1.) that are part of the Sisak diocese will form a database for damage classification, existing condition assessment and evaluation of seismic vulnerability. All churches are classified as individual cultural heritage buildings with construction time period from 14<sup>th</sup> to the early 20<sup>th</sup> century. All of them are built in masonry with timber roofs or masonry domes. Further research would be focused on strengthening techniques and minimizing structures' vulnerability during and after earthquakes. A major part of the preparation is gathering and studying the existing blueprints, archival documentation, and sketches of the churches and their conservation studies. Laser scanning plays an important role in the process of cre-

ating a BIM model of the existing structure, providing essential input for the development of accurate structural models. By utilizing a laser scanner, comprehensive data regarding the geometry, potential faults, earthquake damages, and inherent heritage properties of each individual building can be obtained. This advanced technology not only captures the intricate details of the structures but also offers valuable insights into their historical and cultural significance.

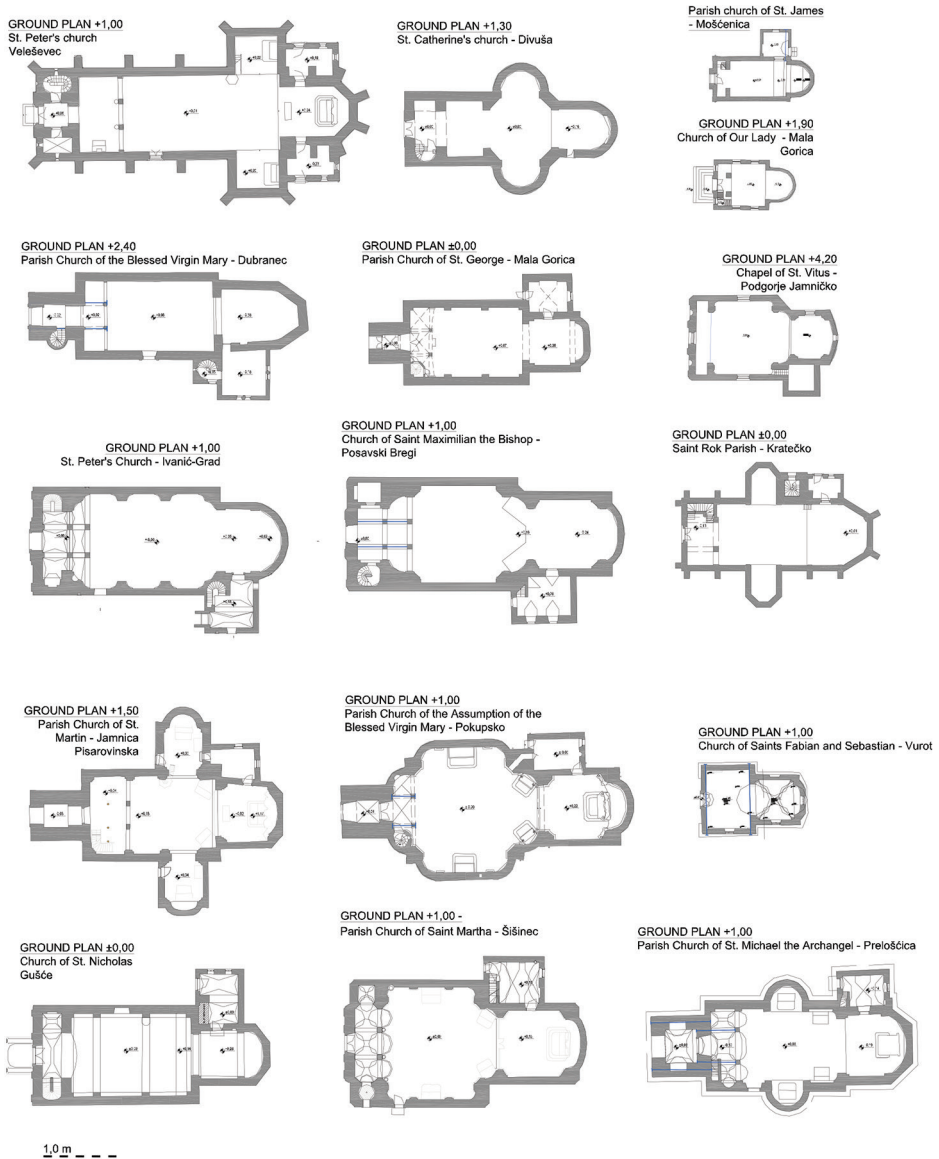


Figure 1. Ground floors of churches included in the research

The laser scanning process thus serves as an added value for understanding of these buildings, and can facilitate effective preservation and restoration. In order to gather the necessary input for seismic analysis, a range of tests will be conducted, encompassing both on-site and laboratory investigations. The semi-destructive tests will predominantly take place on-site, accompanied by visual inspections. The following in-situ tests will be performed: shear tests, flat-jack testing [5], measurement of moisture content, definition of cross section by taking out the sample cones. In order to enhance the accuracy and comprehensiveness of the research, in several case studies advanced techniques such as ground penetrating radar (GPR) and operational modal analysis (OMA) will be used. GPR allows for non-invasive subsurface imaging, providing valuable insights into the internal conditions of the structures, such as detecting potential voids, delaminations, or hidden structural anomalies. On the other hand, OMA involves monitoring the dynamic response of the buildings, enabling the identification of their natural frequencies, mode shapes, and damping characteristics. These modal parameters are crucial for evaluating the structural integrity and dynamic behavior of the buildings. Furthermore, laboratory tests will be conducted to supplement the findings from the on-site assessments. These tests involve subjecting samples of the building materials to controlled laboratory conditions, allowing for more precise measurements of their mechanical properties. By combining the results from the on-site investigations, GPR, OMA, and laboratory tests, a comprehensive dataset will be generated, facilitating a deeper understanding of the structural behavior. By incorporating advanced techniques alongside traditional on-site assessments, researchers can enhance their understanding of the buildings' internal conditions, dynamic characteristics, and mechanical properties, which results as a highest knowledge level according to the EN1998-3 norm. In this research, a comprehensive assessment [6] of the seismic capacity of existing structures will be conducted through a range of analyses. Out-of-plane analyses will be carried out to evaluate local mechanisms, while non-linear static (pushover) analyses will be employed to estimate the overall seismic capacity of the structures. Based on this data, the seismic fragility curves will be calculated for traditional sacral architecture in continental Croatia. These curves serve as a quantitative measure of the vulnerability of the structures, indicating the probability of different levels of damage or failure based on varying seismic intensities. The seismic fragility curves allow for a more precise understanding of the vulnerability of traditional sacral architecture to earthquakes, aiding in the development of targeted retrofitting and mitigation strategies. With all completed steps, the final step will be a definition of vulnerability curves. By conducting a systematic analysis and generating vulnerability curves, this research contributes to the overall knowledge and understanding of the seismic behavior and vulnerability of traditional sacral architecture.

## 4 Importance of proposed research and conclusions

On March 22nd 2020 earthquake of 5,5 magnitude struck Zagreb. Nine months later, another strong, 6,2 magnitude earthquake struck Petrinja, roughly 50 kilometers south-east from Zagreb. After two major earthquakes that occurred in Croatia in the last 3 years, the safety and vulnerability of existing buildings became a very important topic. Statistics showed that out of nearly 80000 damaged buildings in both earthquakes, almost 90% of them were masonry buildings. Regarding the 2<sup>nd</sup> earthquake which is more important for vernacular churches, out of all damaged buildings, 1112 of them are classified as immovable cultural properties. It should be noted there is an addition of almost 2000 damaged buildings in the protected historical urban zones. Since our region shares similar construction techniques, it is of utmost importance to raise our knowledge on the case studies of buildings that are constructed in a very similar way as most of the cultural heritage buildings in Croatia. The topic of this thesis is seismic performance of vernacular sacral architecture under heritage protection. In the Petrinja earthquake 206 individually protected cultural churches were damaged. Sacral buildings are very specific and by their general design very poor in the seismic resistance criteria. When construction date is taken into account, the quality of materials and structural analysis that was based solely on experience and almost exclusively on satisfying the resistance to gravity loads only, one should realize that, in order to protect our cultural heritage, we need to analyze and classify our heritage to preserve it for future generations. One of the first steps in that direction is the proper assessment of our cultural heritage and proposing the best possible strengthening methods to elongate the life of the buildings. This situation is alarming, especially in combination with the knowledge that Croatia is located in fairly seismically active area. With that in mind, the proposed research about seismic vulnerability of vernacular masonry churches in continental Croatia is a major opportunity to expand knowledge in the failure mechanisms during seismic events for typical sacral buildings and to calculate seismic vulnerability of assessed structures. It could be very valuable information for further research in the strengthening of damaged structures and even more important in predicting the seismic vulnerability of those types of buildings on a macro-level. The proposed research is up to date and relevant due to the limited knowledge regarding the seismic vulnerability of churches that are characteristic for this region. The significance of cultural heritage buildings extends beyond their heritage value alone and it's multi-layered. Their heritage value and the potential consequences of their collapse, including the economic impact and potential human casualties, underscore the importance of preserving and safeguarding these structures.



The proposed research is of utmost importance for developing a strategy for retrofitting the cultural heritage on local as well as on regional scale. Similar researches were undertaken in Italy [7] and greatly impacted the strategies for preservation and retrofitting of certain groups of buildings. By building upon this existing body of knowledge and conducting further research, this study can contribute significantly to the preservation and sustainable management of cultural heritage buildings, ensuring their continued protection and cultural significance.

## Literature

- [1] CROATIA DECEMBER 2020 EARTHQUAKE Rapid Damage and Needs Assessment.
- [2] Gottfried. Grünthal and European Seismological Commission. Working Group Macroseismic Scales., European macroseismic scale 1998 : EMS-98. European Seismological Commission, Subcommittee on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic scales, 1998.
- [3] A. Borri, M. Corradi, G. Castori, and A. De Maria: A method for the analysis and classification of historic masonry," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, no. 9, pp. 2647–2665, Sep. 2015, doi: 10.1007/s10518-015-9731-4.
- [4] J. Ortega, G. Vasconcelos, H. Rodrigues, M. Correia, T. M. Ferreira, and R. Vicente: Use of post-earthquake damage data to calibrate, validate and compare two seismic vulnerability assessment methods for vernacular architecture, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 39, p. 101242, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.IJDRR.2019.101242.
- [5] L. Lulić, M. Stepinac, M. Bartolac, and P. B. Lourenço: Review of the flat-jack method and lessons from extensive post-earthquake research campaign in Croatia, *Constr Build Mater*, vol. 384, p. 131407, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131407.
- [6] M. Stepinac, T. Kisicek, T. R. Renić, I. Hafner, and C. Bedon: Methods for the Assessment of Critical Properties in Existing Masonry Structures under Seismic Loads-The ARES Project, doi: 10.3390/app10051576.
- [7] M. Colombi, B. Borzi, H. Crowley, M. Onida, F. Meroni, and R. Pinho: Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data, *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 485–504, Aug. 2008, doi: 10.1007/s10518-008-9073-6.

# Primjena potresnih izolatora u modularnim čeličnim zgradama

Besmir Ismaili<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Ana Skender<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Art-In Statics d.o.o., besmir@artinstatics.com

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku, ana.skender@grad.unizg.hr

## Sažetak

Kod modularnih čeličnih zgrada pri potresnom djelovanju nedostaju istraživanja prema kojima bi se mogle sastaviti smjernice za proračun takvih konstrukcija. Pokazalo se da su kritične točke takvih sustava sami spojevi između modularnih jedinica, u kojima tijekom potresa dolazi do nepoželjnih pojava, kao što su klizanje unutar spojeva i plastifikacija. U ovom radu analizira se ponašanje takvih zgrada uz primjenu potresne izolacije, čija je prednost u tome što smanjuje utjecaje potresnog djelovanja. Za proračun su korištene linearna i nelinearna analiza (FNA). Dobiveni rezultati pokazuju značajno poboljšanje otpornosti konstrukcije na potresno djelovanje.

*Ključne riječi: potresni izolatori, brza nelinearna analiza, modularne čelične konstrukcije, elastični spektar odziva, proračunski spektar, numeričko modeliranje*

## Application of seismic isolators in modular steel buildings

### Abstract

In the case of modular steel buildings under seismic action, there is a lack of research according to which guidelines for the calculation of such structures could be established. It has been shown that the critical points of such systems are the inter-modular connections, as they are prone to undesirable phenomena during seismic activity, such as sliding or inter-modular joint plastification. In this paper, the behavior of modular steel buildings with seismic isolation is analyzed, the advantage of which is that it reduces the effects of seismic action. Linear and non-linear analysis (FNA) were used for the calculation. The obtained results show a significant improvement in the resistance of the structure to seismic actions.

*Key words: seismic isolators, fast nonlinear analysis, modular steel structures, elastic response spectrum, design spectrum, numerical modeling*

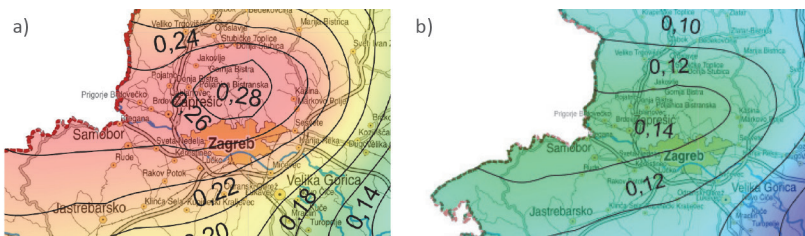
## 1 Uvod

Modularne čelične zgrade, kao koncept i način građenja, sve su više prisutne u građevinarstvu. One nastaju spajanjem više modularnih čeličnih jedinica u jednu cjelinu, pomoću različitih tehnika spajanja. Veliku prednost u usporedbi sa tradicionalnim načinom građenja imaju u smanjenju potrebnog vremena da se izvede ista konstrukcija. S obzirom da se veći dio poslova izvodi pod stalnim nadzorom i u boljim radnim uvjetima, povećava se kvaliteta gradnje, stvaraju se bolji uvjeti rada, smanjuje se rizik tijekom rada i omogućuje se uvođenje automatizacije proizvodnje. Statistički gledano, modularni objekti mogu biti izgrađeni u 30-50 % kraćem vremenu od objekata izvedenih tradicionalnom gradnjom, zanemarujući vremenske uvjete o kojima tradicionalna gradnja itekako ovisi [1]. Gledano s druge strane, jedan od problema s kojim se modularne čelične konstrukcije u današnjem vremenu suočavaju jest nedostatak pravilnika koji bi opisivao njihovo ponašanje, pogotovo pri dinamičkim opterećenjima. Rezultati provedenih istraživanja upućuju na to da su kritične točke takvih konstrukcija upravo spojevi između modularnih jedinica. Annan [2] je bio među prvim istraživačima koji su koristili tradicijske metode proračuna za proračun modularnih čeličnih konstrukcija, pri čemu se problematika spajanja rješavala direktnim zavarivanjem čeličnih elemenata modularnih jedinica. Novija istraživanja rađena su i za vijčane spojeve. Primjerice, klasični vijčani spojevi sa većim rupama pružaju veću toleranciju te su poželjni za sklapanje konstrukcije na terenu, ali takvi spojevi osjetljivi su na klizanje čak i pri manjim opterećenjima [3]. Stoga su predloženi kompaktniji spojevi sa većim kapacitetom uz napomenu da se spojevi trebaju dodatno ispitati i analizirati za veće potresno djelovanje [4]. Osim klasičnih vijčanih spojeva, predstavljeni su i spojevi sa prednapetim vijcima i navojnim šipkama te je zaključeno da su takvi spojevi prihvatljivi i za fazu montaže [5]. Vrijedi napomenuti da takve analize u sebi sadržavaju ideju trošenja energije pri potresnom djelovanju u samim spojevima između modularnih jedinica. Odabrani način spajanja modularnih jedinica ujedno i definira njihovo ponašanje pri potrebnom djelovanju te se proračun provodi prema pravilima proračuna sposobnosti nosivosti (engl. *Capacity design rule*), predstavljenim u normi HRN EN 1998-1. Drugi koncept proračuna prema istoj normi jest izolacija u podnožju (engl. *base isolation*), pri čemu se smanjenje potresnog odziva sustava koji preuzima bočne sile smije postići povećanjem osnovnog perioda izolirane konstrukcije, prilagodbom osnovnoga oblika i povećanjem prigušenja, ili kombinacijom tih učinaka [6]. Kod proračuna modularnih čeličnih konstrukcija, na prvi pogled izgleda da je glavni zadatak najbolji mogući detalj spoja modularnih jedinica. Suvremena istraživanja pokazuju da se uobičajeni detalji spajanja modularnih jedinica zapravo suočavaju s problematikom popustljivosti i klizanja dok vrlo složeni detalji otežavaju izvedbu. S druge strane, sama vrsta gradnje, radi mogućnosti izvedbe, zahtijeva višu razinu tolerancije te bi projektiranje takvih konstrukcija bez tolerancije vrlo vjerojatno dovelo do velikih

problema tijekom izvedbe. Smanjenjem veličine unutarnjih sila koje se pojavljuju tijekom potresa, smanjili bi utjecaj popustljivosti i klizanja spojeva te bi sačuvali mogućnost korištenja tolerancije u određenim pozicijama spojeva. Prethodna istraživanja modularnih čeličnih zgrada zasnivaju se na pravilima proračuna sposobnosti nosivosti, pri čemu se u kritičnim točkama (spojevima) računa na trošenje energije potresa što ujedno i povećava rizik kod takvih konstrukcija. Cilj ovog istraživanja je značajno smanjenje unutarnjih sila u elementima modularne čelične konstrukcije korištenjem drugog koncepta, odnosno izolacije u podnožju. Takav pristup omogućuje pojednostavljenje spojeva između modularnih jedinica. U ovom radu, analizirana su dva modela modularne čelične zgrade sa i bez potresnih izolatora, uspoređeni su horizontalni pomaci konstrukcije, unutarnje sile i ubrzanja. U oba modela, spojevi modularnih jedinica pretpostavljeni su kao apsolutno kruti spojevi. Za parametre potresnog djelovanja uzeti su podaci za grad Zagreb. Rezultati pokazuju značajno poboljšanje u ponašanju konstrukcije pri potresnom djelovanju, te potvrđuju prethodne analize da je primjena potresne izolacije prikladna za ovo područje [7].

## 2 Opis konstrukcije

Za analiziranu zgradu stambene namjene usvojena je katnost Po+P+3 (podrum + prizemlje + 3 kata). Zgrada je pravilnog tlocrtnog oblika, dimenzija 15,00 m x 45,00 m i visine 12,00 m. Modularne jedinice su dimenzija  $B_1 \times L_1 \times H_1 = 6,00 \times 3,00 \times 3,00$  m i  $B_2 \times L_2 \times H_2 = 3,00 \times 3,00 \times 3,00$  m (na dijelu hodnika). Svi stupovi modularnih jedinica su poprečnog presjeka 150 x 150 x 10 mm, sve grede su poprečnog presjeka UNP200 dok su sekundarni profili poda i krova modularnih jedinica hladno oblikovani C profili. Korišteni materijal za sve elemente modularnih jedinica je čelik S235. Kruta konstrukcija podruma nije uzeta u obzir budući da je za promatrani slučaj bitna konstrukcija iznad potresnih izolatora (gornji ustroj). Vršno ubrzanje temeljnog tla odabrano je iz karte potresnih područja [8] za povratno razdoblje od 475 godina i iznosi 0,26g, te za povratno razdoblje od 95 godina i iznosi 0,14g. Tip temeljnog tla je C, u skladu sa HRN EN 1991-1, tablica 3.1 [6].

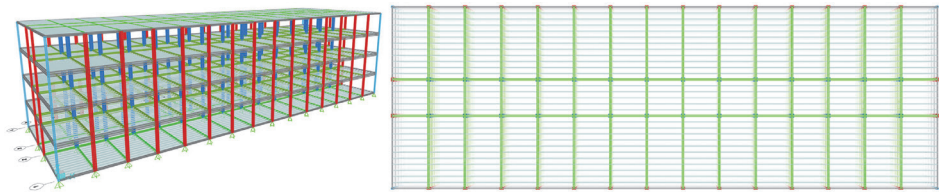


Slika 1. Karta potresnih područja za područje grada Zagreba: a) povratno razdoblje od 475 godina i b) povratno razdoblje od 95 godina [8]

### 3 Analiza modela

#### 3.1 Model 1 – bez potresne izolacije

Promatramo model bez potresne izolacije. Proračun takvog modela provodi se prema pravilima proračuna sposobnosti nosivosti. Za provjeru graničnog stanja uporabljivosti korištena je linearna analiza s elastičnim spektrom odziva, dok je za provjeru graničnog stanja nosivosti, korištena linearna analiza sa proračunskim spektrom odziva, uz pretpostavku niske razine duktilnosti konstrukcije (DCL, faktor ponašanja  $q = 1,5$ ). Također, napravljena je i provjera prema metodi bočnih sila pri čemu ukupna poprečna sila u podnožju iznosi  $F_b = 0,423m$ , gdje je  $m$  ukupna masa zgrade iznad krutog podruma. Masa zgrade i definirani spektri proračunati su u skladu s normom HRN EN 1998-1 [6]. Analiza modela konstrukcije napravljena je u računalnom programu SAP2000.



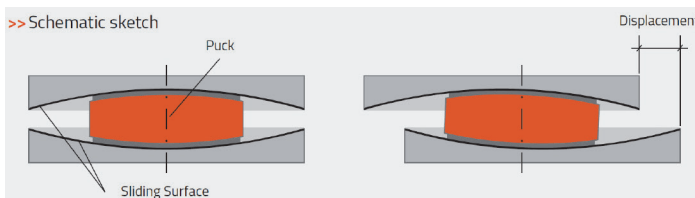
Slika 2. 3D numerički model konstrukcije sa zadanim rubnim uvjetima (lijevo) i tlocrtni prikaz karakteristične etaže (desno)

#### 3.2 Model 2 – s potresnom izolacijom

Konstrukcije se potresno izoliraju, ako postoji potreba za povećanjem razine sigurnosti, za operativnošću nakon potresa i za smanjenjem bočne proračunske sile. Također, potresna izolacija se primjenjuje kod konstrukcija koje imaju ograničeni kapacitet duktilnosti ili ukoliko postojeća građevina nije sigurna pri potresnom djelovanju [9]. U ovom slučaju, duktilnost konstrukcije te pojava klizanja između modularnih jedinica pri značajnom potresnom opterećenju, razlozi su zašto bi konstrukcije takvog tipa trebalo potresno izolirati. Ugradnjom potresnih izolatora, smanjuju se potresne sile zbog toga što se gornji ustroj "odvaja" od temelja i tla. Temeljno načelo potresne izolacije je promjena dinamičkog ponašanja konstrukcije ugradnjom potresnih izolatora, odnosno produljenje osnovnog perioda titranja na način da konstrukciju pomaknemo iz područja spektra sa većim ubrzanjima prema manjim. Elementi izolacijskih sustava ispunjavaju jednu ili kombinaciju sljedećih funkcija: sposobnost nošenja vertikalnog opterećenja kombiniranu s povećanom bočnom savitljivošću i velikom vertikalnom krutošću, histerezno ili viskozno trošenje energije, sposobnost ponovnog centriranja, ograničenje bočnih pomaka (dovoljna elastična

krutost) pri nepotresnim uporabnim bočnim opterećenjima [6]. U normi HRN EN 15129 [10] dane su smjernice za proračun protupotresnih naprava. Potresni izolatori koji su pokriveni ovom normom su: elastomerni izolatori, koji mogu biti armirani elastomerni ležajevi s niskim (LDRB) i visokim prigušenjem (HDRB) te s olovnom jezgrom (LRB), i klizni izolatori, koji mogu biti s ravnom kliznom površinom (engl. *Flat surface slider*) i zakrivljenom kliznom površinom (engl. *Curved surface slider*). Kod kliznih izolatora, period cijele konstrukcije ovisi o vertikalnoj proračunskoj sili u izolatoru, efektivnom polumjeru izolatora, ukupnom proračunskom pomaku izolatora i koeficijentu trenja kontaktnih površina. Proizlazi da period u ovom slučaju ne ovisi o krutosti konstrukcije te da slučajne torzijske učinke možemo riješiti rasporedom izolatora. Prema normi HRN EN 1998-1 propisano je da za pojednostavljeni linearni proračun, period izolirane konstrukcije treba biti barem tri puta veći od osnovnog perioda gornjeg ustroja uz pretpostavku upetosti u podnožju, ali manji od 3 sekunde. Iz ovog uvjeta proizlazi da je ovakvo rješenje učinkovitije kod konstrukcija sa malim osnovnim periodima, pogotovo kod konstrukcija čiji periodi odgovaraju maksimalnim vrijednostima spektra. Učinkovitost potresne izolacije opada kod većih vrijednosti osnovnog perioda. Također vrijedi napomenuti da ovakvo rješenje nije učinkovito u područjima mekog uslojenog tla. Takvo tlo ima dulje predominantne periode od perioda koji se javljaju u čvrstom tlu, te bi u tom slučaju izolacija mogla biti kontraproduktivna uslijed rezonantnih pojava prilikom poklapanja predominantnog perioda potresa i perioda izoliranog konstrukcijskog sustava građevine [11]. Takve okolnosti zabilježene su u području Mexico Citya [9].

U našem slučaju, odabrani su klizni izolatori sa dvije zakrivljene klizne površine (engl. *Double Curved Surface Sliders*) te su pretpostavljeni ulazni parametri u skladu s tehničkim specifikacijama proizvođača (MAURER Curved Surface Slider SIP®-D) [12]. Takvi klizni izolatori ostvaruju pomak i povećavaju period titranja izolirane konstrukcije na principu njihala. Ponovno centriranje ostvaruje se pomoću vlastite težine i geometrije izolatora. Trošenje energije kod kliznih izolatora ostvaruje se kroz trenje koje se razvija na dodirnim kliznim plohamama.

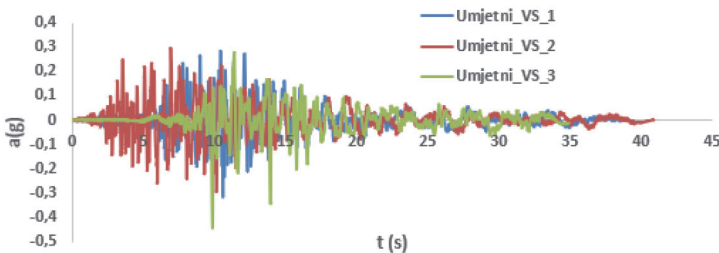


**Slika 3. Shematski prikaz kliznog izolatora [12]**

Sustav potresne izolacije sastoji se od 64 kliznih izolatora, sa dinamičkim koeficijentom trenja 5,5 %, efektivnog polumjera 2,0 m, koji omogućavaju maksimalni horizontalni pomak 300 mm. Za proračun konstrukcije s potresnom izolacijom do-

zvoljava se pojednostavljeni linearni proračun [6], koji je u ovom radu napravljen na temelju normi HRN EN 1998-1 [6], HRN EN 1337-7 [13] i HRN EN 15129 [10] te smjernica koje su dane u normi HRN EN 1998-2 [14]. Npr. smjernice za proračun efektivne krutosti izolatora koje se mogu primijeniti i u zgradama, pri čemu se u nekoliko iterativnih koraka korigira efektivna krutost izolatora (koja ovisi o ukupnom pomaku, a s druge strane ukupni pomak ovisi o ordinati spektra) pa dobivamo ukupni proračunski pomak. Takav postupak je ograničen te su dane smjernice kada se takav proračun smije koristiti [6]. Radi optimalizacije, konačan odabir izolatora najčešće se radi u suradnji sa proizvođačem. U ovom slučaju, uz pretpostavku da gornji ustroj ne troši energiju potresa, osim pojednostavljenog linearnog proračuna, koristila se i nelinearna modalna analiza (FNA – Fast Nonlinear Analysis) uz umjetne funkcije vremenskog zapisa, koje su kombinirane u tri različita scenarija potresa (tablica 1). Umjetne funkcije (slika 4.) generirane su od realnih vremenskih zapisa gdje elastični spektar odziva (za povratni period od 475 godina, vršno ubrzanje temeljnog tla 0,26g i prigušenje 5 %) predstavlja ciljani spektar. S time:

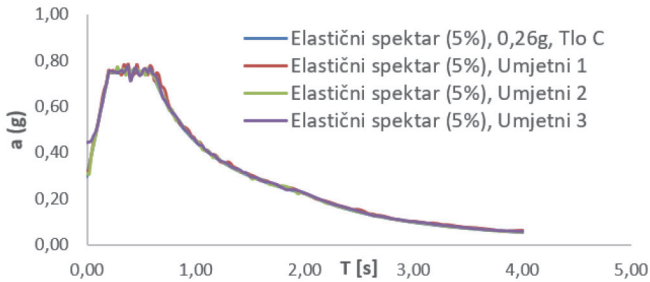
- prva umjetna funkcija vremenskog zapisa generirana je od realnog vremenskog zapisa Imperial Valley
- druga umjetna funkcija vremenskog zapisa generirana je od realnog vremenskog zapisa Kobe
- treća umjetna funkcija vremenskog zapisa generirana je od realnog vremenskog zapisa Kocaeli



Slika 4. Umjetne funkcije vremenskog zapisa generirane od proračunskog spektra odziva

Nadalje su prikazani generirani umjetni spektri (slika 5.), gdje je maksimalna neusklađenost u prvom i drugom spektru 8 %, dok je u trećem spektru 16 % (u trećem spektru neusklađenost se događa na početku funkcije, tj., u višim oblicima titranja). Prema HRN EN 1998-2, točka 7.5.5 (4), proračunsko prigušenje smije se upotrijebiti samo za oblike vibracija čiji je period veći od  $0,8 T_{eff}$  pri čemu  $T_{eff}$  predstavlja proračunski period izolacijskog sustava [14]. U ovoj analizi, za provjeru unutarnjih sila u gornjem ustroju, proračunski spektar u cijeloj svojoj domeni proračunat je za prigušenje od 5 %, dok je za provjeru pomaka korišten korigirani spektar sa prora-

čunskom prigušenjem izolacijskog sustava  $\xi_{eff}$  koje iznosi 17 %. Takav princip omogućuje određivanje maksimalne sile u gornjem ustroju i ujedno omogućuje racionalan način odabira izolatora.



Slika 5. Spektri odziva umjetnih funkcija vremenskog zapisa generirane od proračunskog spektra

Tablica 1. Kombinacija vremenskih zapisa za pojedini scenarij

Scenarij	Smjer X	Smjer Y
Scenarij 1	Umjetni vremenski zapis 1	Umjetni vremenski zapis 2
Scenarij 2	Umjetni vremenski zapis 2	Umjetni vremenski zapis 3
Scenarij 3	Umjetni vremenski zapis 3	Umjetni vremenski zapis 1

## 4 Rezultati

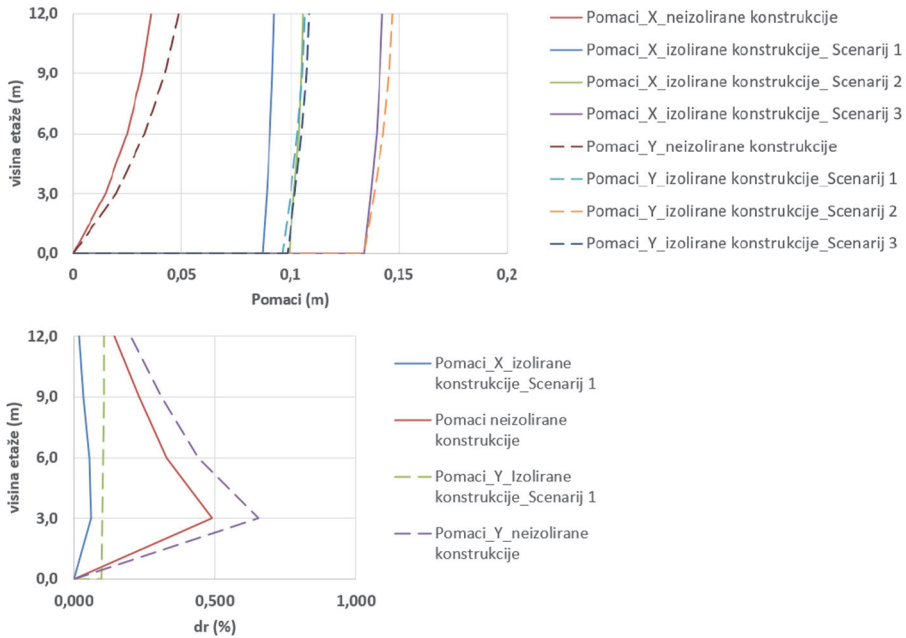
Razmatrani su rezultati pojedinog modela. Prema očekivanom, osnovni period konstrukcije povećao se sa 0,52 s za neizolirani sustav na 2,20 s za izolirani sustav, što predstavlja povećanje više od 4 puta.

Tablica 2. Usporedba perioda konstrukcije za promatrana dva modela

	1. oblik		2. oblik		3. oblik	
	T [s]	M [%]	T [s]	M [%]	T [s]	M [%]
Model 1	0,52	76% - Y	0,51	76% - rZ	0,45	76% - X
Model 2	2,20	99% - Y	2,19	99% - X	2,09	99% - rZ

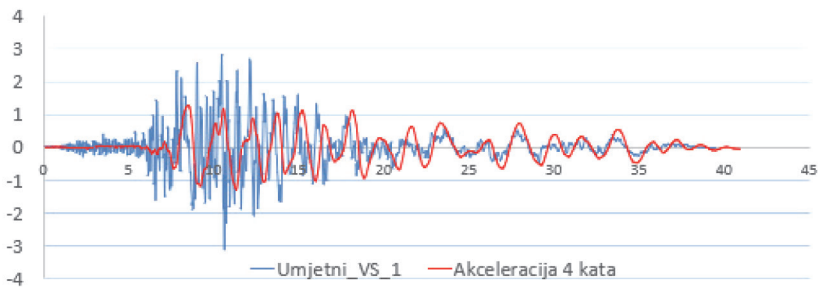
Analizirani su i pomaci centra mase konstrukcije. Za slučaj bez potresne izolacije, maksimalni horizontalni pomak na najgornjem katu u smjeru y iznosi 47 mm, što predstavlja zabrinjavajuću vrijednost pogotovo za takav tip konstrukcije. U izoliranom modelu, kao posljedicu dobivamo veće pomake, ali su ti pomaci koncentrirani u razini potresne izolacije [7] te se rješavaju odabirom izolatora s dovoljnim kapacitetom. Maksimalni pomak izolirane konstrukcije u smjeru y iznosi 147 mm. Na slici 6 prikazani su horizontalni pomaci konstrukcije za pojedinu etažu.





**Slika 6. Pomaci za izoliranu i neizoliranu konstrukciju (gore) i međukatni pomak (dolje) za tri promatrana scenarija potresa**

Također je promatrano ubrzanje četiri kata tijekom pobude s umjetnim vremenskim zapisom 1, te se dobivaju značajno manje akceleracije. Akceleracija najgornjeg kata u odnosu na pobudu smanjila se za 3 puta (Slika 7).



**Slika 7. Usporedba akceleracije najviše etaže i pobude u smjeru X, za Scenarij 1**

Kritična točka ove analize su unutarnje sile koje se pojavljuju u elementima modularnih jedinica te u spojevima između modularnih jedinica. Razina uzdužnih sila, tijekom potresnog djelovanja, smanjila se za 49 % zbog "klizanja" konstrukcije na izolatorima u usporedbi sa neizoliranim modelom. Razina poprečnih sila smanjila

se za 37 %, a momenata savijanja za 58 %, što predstavlja značajno poboljšanje. Na taj način značajno je povećana otpornost konstrukcije na potresno djelovanje, te je smanjen utjecaj potresa na spojevima između modularnih jedinica.

**Tablica 3. Maksimalne unutarnje sile za karakteristični stup i gredu u osi B za anvelopu potresnog opterećenja**

	Neizolirana konstrukcija	Izolirana konstrukcija	Smanjenje [%]
Uzdužna sila u stupu [kN]	427	217	49
Poprečna sila [kN]	57	36	37
Moment savijanja [kNm]	132	56	58

## 5 Zaključak

Potresna izolacija mijenja dinamičko ponašanje zgrada, omogućuje pomak cijele konstrukcije iz područja sa većim vrijednostima ordinate spektra ubrzanja ka manjim te kao posljedica toga pojavljuju se manje unutarnje sile u konstruktivnim elementima, što je i potvrđeno u ovom radu. Napravljen je linearni proračun primjenjujući spektar odziva konstrukcije (za neizolirani sustav) i nelinearna analiza (FNA – *Fast nonlinear analysis*) pomoću Modalne analize sa Ritzovim vektorima (za izolirani sustav). Također je napravljena i komparativna analiza neizoliranog i izoliranog sustava na temelju horizontalnih pomaka, relativnih međukatnih pomaka te akceleracije pojedinih etaža. Dobiveni rezultati pokazuju značajno poboljšanje u ponašanju konstrukcije tijekom potresnih djelovanja. Promatran je karakteristični poprečni okvir konstrukcije, te su uspoređene vrijednosti unutarnjih sila. Dobiveni rezultati pokazuju da momenti savijanja u izoliranom sustavu padaju za 58 %, što je značajno poboljšanje. Rad predstavlja početnu fazu rješavanja problematike modularnih čeličnih zgrada pomoću izolacije u podnožju, te će poslužiti za daljnju analizu modularnih čeličnih konstrukcija te analizu njihovog ponašanja pri potresnom djelovanju, s ciljem pojednostavljenja načina spajanja modularnih čeličnih jedinica.

## Literatura

- [1] GEP, [https://www.gep.com/blog/mind/some-assembly-required-modular-buildings-are-making-construction-cheaper-faster-and-more#:~:text=Since %20the %20construction %20of %20the,50 %25 %20quicker %20than %20traditional %20construction](https://www.gep.com/blog/mind/some-assembly-required-modular-buildings-are-making-construction-cheaper-faster-and-more#:~:text=Since%20the%20construction%20of%20the,50%25%20quicker%20than%20traditional%20construction)
- [2] Annan, C.D., Youssef, M.A., El-Naggar, M.H.: Effect of directly welded stringer-to beam connections on the analysis and design of modular steel building floors, *Adv Struct Eng* (2009), pp. 373–383.

- [3] Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H., Bi, K.: Structural response of modular buildings - an overview, *Journal of Building Engineering* (2017), pp. 45-56.
- [4] Gunawardena, T., Ngo, T., Mendis, P., Aye.: Structural performance under lateral loads of innovative prefabricated modular structures, *From Materials to Structures: Advancement Through Innovation - Proceedings of the 22nd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, ACMSM 2012, (2013)*, pp.717-722.
- [5] Sanches, R., Mercan O.: Vertical post-tensioned connection for modular steel buildings, *12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec*, pp.10-28, 2019.
- [6] Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC2009) + nacionalni dodatak
- [7] Nikolin Hima, Maria Gabriella Castellano: Seismic isolation of buildings in Croatia, *1st Croatian Conference on Earthquake Engineering, Zagreb*, pp.1491-1502, 2021.
- [8] Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I. (2011) Karta potresnih područja za Republiku Hrvatsku, povratni period 90 i 475 godina. <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/>
- [9] Naeim, F., Kelly, J.M.: *Design of seismic isolated structures-From theory to practice*, J. Wiley and Sons, New York, Sjedinjene Američke Države, 1999.
- [10] HRN EN 15129: Protupotresne naprave (EN 15129:2018)
- [11] Kelly, T. E.: *Base Isolation Of Structures: Design Guidelines*, 2001.
- [12] MAURER Curved Surface Slider SIP-D, Technical information, [https://www.maurer.eu/fileadmin/mediapool/downloads/TI\\_004\\_EN\\_MAUERER\\_SIP-D\\_online.pdf](https://www.maurer.eu/fileadmin/mediapool/downloads/TI_004_EN_MAUERER_SIP-D_online.pdf)
- [13] HRN EN 1337-7: Konstrukcijski ležajevi – 7.dio: Sferni valjkasti PTFE ležajevi (EN 1337-7:2004)
- [14] Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 2. dio: Mostovi (EN 1998 - 2:2005 + A1:2009 + AC:2010 + A2:2011) + nacionalni dodatak

# Procjena terenske prohodnosti i pokretljivosti vojnih vozila

Ivana Gredelj<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Saša Ahac<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, OSRH, ivana.gredelj44@gmail.com

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za prometnice, sasa.ahac@grad.unizg.hr

## Sažetak

Pri premještanju oružanih snaga u sklopu borbenih operacija važno je procijeniti terensku prohodnost i pokretljivost vojnih vozila. Pritom su čimbenici za njihovu procjenu stanje na terenu, taktičko-tehnološke i vozno-dinamičke karakteristike vozila. Utvrđivanje terenske prohodnosti omogućava uvid u ograničenja pokretljivosti vozila i stvaranje pretpostavki o mogućim smjerovima kretanja vlastitih i protivničkih snaga. U ovom radu prikazana je primjena geografskog informacijskog sustava (GIS) u određivanju prohodnosti terena i opisan NATO Model procjene pokretljivosti vozila (NRMM i NG-NRMM).

*Ključne riječi: vojna vozila, karte terenske prohodnosti vozila, geografski informacijski sustav (GIS), NRMM, NG-NRMM*

## Military vehicles cross-country passability and mobility evaluation

### Abstract

When moving armed forces as part of combat operations, it is important to assess the cross-country passability and mobility of military vehicles. Factors for their assessment are the field conditions, the tactical-technological and dynamic characteristics of the vehicle. Determining the cross-country passability enables an insight into the limitations of vehicle mobility and the creation of assumptions about the possible directions of movement of one's own and opposing forces. Several models have been developed to assess cross-country mobility. In this paper, the application of Geographic Information System (GIS) in determining the terrain passability is presented and the NATO Reference Mobility Model (NRMM and NG-NRMM) is described.

*Key words: military vehicles, cross-country passability maps, Geographic Information System (GIS), NRMM, NG-NRMM*

## 1 Uvod

Kako bi se smanjila izloženost protivničkim snagama i ostvarila prednost pred protivnikom, vojna vozila moraju biti pokretljiva te zadržati najveću moguću brzinu pri savladavanju terena u svim terenskim i vremenskim uvjetima. Pri planiranju borbenih operacija čimbenici koji utječu na procjenu pokretljivosti vojnih vozila su postojeće stanje na terenu (tip tla, reljef, vode, vegetacija, postojeće prometnice i ostali objekti), taktičko-tehnološke i vozno-dinamičke karakteristike tih vozila [1]. Definiranje tih čimbenika naziva se "utvrđivanje prohodnosti terena" (UPT). Dakle, UPT pruža uvid u ograničenja pokretljivosti vojnih vozila te omogućava stvaranje pretpostavki o mogućim smjerovima kretanja vlastitih i protivničkih snaga.

Prema [2], pokretljivost vozila procjenjuje se na određenim područjima i pravcima moguće uporabe određenih vozila pri različitim terenskim uvjetima i godišnjim dobima. Pritom treba razlikovati i vrednovati pokretljivost taktičkih vozila, pokretljivost kotačnih oklopnih vozila, pokretljivost gusjeničnih borbenih vozila i drugih specijalnih vozila. Pokretljivije vozilo kreće se većom brzinom i pri lošim uvjetima na cesti, izvan prometnica te pri savladavanju prepreka. Primarni cilj pri UPT je utvrditi u kojoj mjeri pojedini fizičko-geografski čimbenik i/ili kombinacija čimbenika usporavaju vozilo prilikom kretanja u odnosu na njegovu maksimalnu moguću brzinu kretanja. U dosadašnjim istraživanjima prikazanim u [1, 3-6] uspostavljeni su brojni modeli UPT koji koriste različite metodološke osnove, poput matematičkih (Army Material Command Mobility Model (AMC) i NATO Reference Mobility Model (NRMM)) i stohastičkih modela (Modular Semi-Automated Forces (MoDSAF), Close Combat Tactical Trainer (CCTT), Warfighting Simulation (WARSIM)). Kvaliteta modela ovisi o kvaliteti ulaznih podataka, a zbog složenosti realnog svijeta (vrsta vozila, reljefa, vode, tipova tla, vegetacije, klimatsko meteoroloških prilika) validacija ovih modela pokazala se zahtjevnom.

UPT rezultira izradom karata terenske prohodnosti vozila (TPV karte) – grafičkim prikazima područja na terenu koja je potrebno izbjegavati pri vojnim operacijama, tj. kartama koje prikazuju područja koja su potpuno neprohodna, uvjetno prohodna te potpuno prohodna za određeno vozilo pri različitim terenskim uvjetima. Tijekom izrade TPV karte potrebno je razmotriti i sistematizirati sve prisutne čimbenike na prostoru planiranih aktivnosti. Zbog toga se javlja potreba za objedinjavanjem podataka potrebnih za izradu ovih karata u jedinstvenu bazu, što se postiže primjenom geografskog informacijskog sustava (GIS). Nadalje, oružane snage u svojem sastavu imaju razna vozila, poput borbenih vozila, inženjerijskih strojeva, specijalnih vozila. Zbog toga je pri izradi modela vozila koje će se primijeniti u procjeni pokretljivosti potrebno definirati mjerodavno vozilo, tj. vozilo određenog tipa i dimenzija koje karakterizira određenu grupu vozila i u potpunosti odgovara zakonskim propisima o dimenzijama vozila, odnosno međunarodnim preporukama [7]. Procjena pokretljivosti vojnih vozila treba se temeljiti na vozno-dinamičkim karakteristikama i ispi-

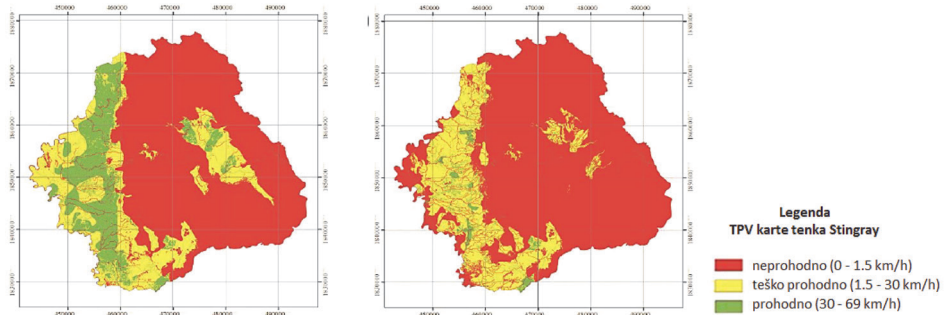
tivanju geometrije kretanja mjerodavnog vojnog vozila. Takav pristup rezultira odabirom optimalne rute vojnih vozila u cilju postizanja željene terenske prohodnosti vozila (TPV). U ovom radu prikazana je primjena GIS-a pri UPT i izradi TPV karata. Također je prikazan NATO Model procjene pokretljivosti vozila (NATO Reference Mobility Model, NRMM), simulacijski alat namijenjen za predviđanje TPV-a.

## 2 Procjena pokretljivosti vojnih vozila

Pokretljivost vojnih vozila dijeli se na stratešku, operativnu i taktičku. Strateška pokretljivost podrazumijeva transport vojnih vozila neposredno pred zonu područja borbenih operacija primjenom specijalnih vozila koja koriste kopnene, vodene i zračne puteve za prijevoz vojnih vozila (npr. prijevoz tenkova vlakom i cestovni transport). Operativna pokretljivost podrazumijeva kretanje vojnih vozila vlastitim pogonom, pretežno cestama ili uređenim putevima. Kriteriji za ocjenu operativne pokretljivosti su [8]: brzina kretanja vozila (omjer snage i mase vozila), masa i dimenzije vozila (utječu na prohodnost vozila kroz različite terene), autonomija kretanja ili domet (ovisi o potrošnji goriva) te stupanj mehaničke pouzdanosti (ovisi o složenosti vozila). Taktička pokretljivost podrazumijeva kretanje vozila u stvarnom ili neposrednom kontaktu s protivničkim snagama. Taktička pokretljivost može se ocijeniti pomoću sljedećih kriterija [8]: brzine, manevarske sposobnosti, sposobnosti kretanja izvan uređenih puteva, borbene sposobnosti. Terenska prohodnost i pokretljivost vozila prvenstveno ovisi o gustoći postojećih cesta i putova [5]. Gusta mreža prometnica na operativnom području pozitivno utječe na pokretljivost vozila, ali za kompleksnu analizu prohodnosti terena u obzir je potrebno uzeti i sljedeće elemente: reljef, vegetacijski pokrov, vrsta i sastav tla, površinske vode, atmosferske prilike, godišnje doba i taktičko-tehničke karakteristike vozila. U dosadašnjim istraživanjima terenske prohodnosti i pokretljivosti vojnih vozila najviše pažnje posvećivalo se pokretljivosti na taktičkoj razini, dok se planiranje ruta na strateškim i operativnim razinama svodilo na vizualne preglede trasa cesta te zaobilaznje prepreka [1, 3-5]. U nastavku ovog poglavlja opisana je mogućnost primjene GIS-a pri UPT i izradi TPV karata. Također je opisan model NRMM, motivacija za njegov razvoj te njegova primjena.

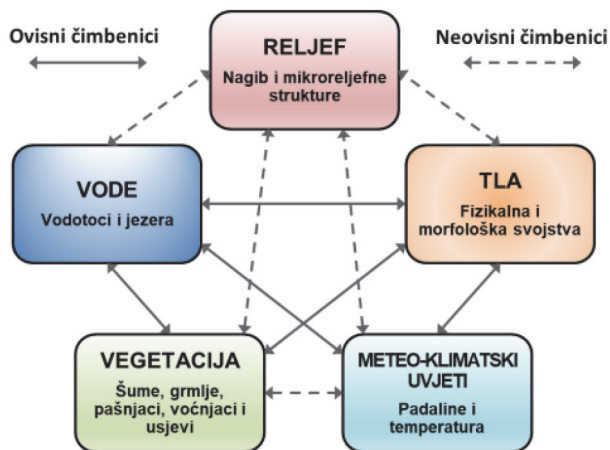
### 2.1 Primjena GIS-a u izradi TPV karata

Tijekom kreiranja TPV karte (Slika 1) potrebno je razmotriti i sistematizirati sve prisutne čimbenike na razmatranom operativnom području. Tematske TPV karte pružaju općenitu informaciju za široki prostor koji prikazuju. U svrhu predviđanja TPV-a koriste se brojni i različiti izvori prostornih podataka. Od kraja 1990-ih u izradi karata primjenjuje se GIS, u kojem su integrirani i objedinjeni svi potrebni procesi organizacije, strukturiranja, modeliranja, procesiranja, analize, evaluacije i vizualizacije TPV-a. GIS je tako postao osnovni alat za procjenu TPV-a [6].



Slika 1. Primjer karte TPV (tenka Stingray) u sušnom periodu (lijevo) i kišnom periodu (desno) [6]

Današnji GIS alati olakšavaju izradu TPV karata jer ubrzavaju pripremu, obradu, analizu, vizualizaciju i distribuciju velike količine podataka te doprinose većoj pouzdanosti i produktivnosti cjelokupnoga procesa. Procjenu TPV-a treba promatrati i iz aspekta kvalitete te detaljnosti ulaznih podataka [1]. Naime, TPV ovisi o prisutnosti svakoga pojedinog fizičko-geografskog čimbenika na zemljištu, te njihovoj konačnoj međusobnoj interakciji. Na brzinu vozila pri savladavanju terena svaki od navedenih čimbenika djeluje pojedinačno i u međuovisnosti s ostalim čimbenicima kao što je vidljivo na slici 2.



Slika 2. Ovisni i neovisni čimbenici TPV-a [6]

Razvoj GIS-a omogućio je velik napredak u istraživanju utjecaja karakteristika terena zbog pojave mnoštva izvora prostornih podataka uz pomoć kojih je moguće stvoriti vrlo točne i precizne digitalne modele reljefa (DMR) i terena (DMT). Pritom se za strukturiranje i kreiranje prostorne baze podataka za daljnje analize i kreiranje informacija o TPV-u primjenjuju kako primarni izvori podataka (vlastita mjerenja) tako

i sekundarni izvori poput postojećih kartografskih prikaza [1]. Prema dosadašnjim istraživanjima danim u [1, 3-5], GIS omogućuje kvalitetnu analizu geomorfoloških parametara u funkciji određivanja zaštitnog potencijala reljefa (mogućnost sakrivanja borbene tehnike pri provedbi operacija) i TPV-a. Osnovna prednost GIS-a je u integriranim procesima na jedinstvenoj platformi koja zaokružuje procese od prikupljanja podataka do vizualizacije rezultata [6].

Zaključno, na TPV kartama dana je sinteza interakcije svih čimbenika koji su prisutni u realnom svijetu. Tematske karte TPV pružaju općenitu informaciju za široki prostor koji prikazuju. Za planiranje mogućeg pokreta većega broja vozila kroz određeno područje potreban je široki prostor koji je u skladu s veličinom snaga kojom se želi kroz njega proći [4]. Temeljem algoritama i računalno generiranih GIS podloga moguće je kreirati uska i ograničena područja prohodna za veći broj vozila, odnosno avenije i koridore prohodnosti vozila [5]. Pritom interaktivni GIS omogućuje planiranje rute kretanja vozila odabirom polazišne i završne točke kretanja.

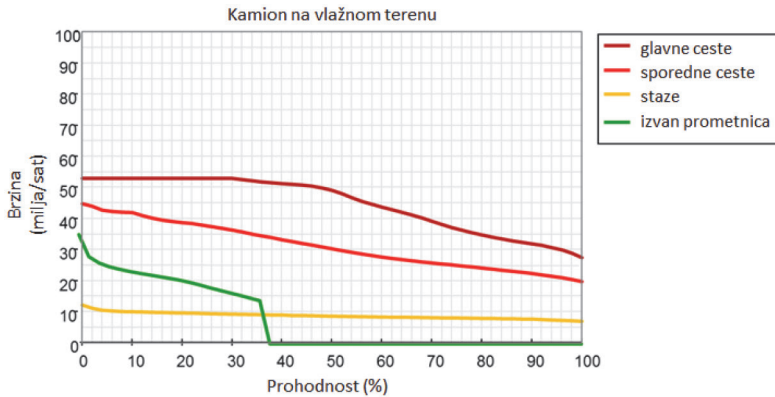
## 2.2 NATO Model procjene pokretljivosti vozila (NRMM)

NRMM razvijen je 1970-ih godina u SAD-u. To je simulacijski alat namijenjen za predviđanje TPV-a, a može biti korišten za predviđanje kretanja po cestovnoj infrastrukturi te izvan nje. Ovaj model u obzir uzima tip terena, vlažnost i neravnine te geometriju vozila. Za provedbu simulacije pokretljivosti, NRMM zahtijeva širok i detaljan skup podataka koji se dijele na četiri skupine [9]:

1. scenarij
2. teren
3. vozilo
4. operater.

Izlazni podaci simulacije daju predviđanja brzine i ograničavajućih čimbenika na terenu. Standardni oblik izlaznih podataka NRMM-a su krivulje kumulativne brzine. Na slici 3 dan je primjer krivulja kumulativne brzine modelirane za kamion na vlažnom terenu. Vidljivo je da je za kamion na vlažnom terenu u potpunosti prohodno 36 % analiziranog područja, dok je na ostatku područja kretanje moguće samo primarnim i sekundarnim cestama te neutvrđenim stazama. Brzina vožnje na 30 % "najbržih" primarnih cesta je 85 km/h, nakon čega se postepeno smanjuje na 45 km/h. Brzina vožnje na sekundarnim cestama kreće se od 32 do 73 km/h, a brzina vožnje neutvrđenim stazama kreće se od 10 do 19 km/h.





Slika 3. Krivulje kumulativne brzine [9]

NRMM se pokazao od velike praktične važnosti za usporedbu između kandidata za dizajn vozila i za procjenu pokretljivosti postojećih vozila prema određenim scenarijima, ali postoji niz nedostataka ovog modela:

- temelji se na empirijskim opažanjima, stoga je ekstrapolacija izvan ispitnih uvjeta teška ili nemoguća (ovisi o mjerenjima tla na licu mjesta)
- ne omogućuje trodimenzionalnu analizu
- ne uzima su obzir bočnu stabilnost vozila
- teško ga je implementirati u suvremene modele simulacije kretanja vozila
- nepouzdan kod primjene različitih modela tla [9, 10].

Zbog ovih nedostataka je 2014. formirana radna skupina za razvoj NATO modela procjene pokretljivosti nove generacije (Next-Generation NATO Reference Mobility Model, NG-NRMM). Cilj radne skupine bio je razviti model s poboljšanim mogućnostima, kao npr. povećanom fleksibilnošću za podršku operacijama procjenom operativne pokretljivosti različitih vozila na različitim područjima i rutama te poboljšanom vjerošću modela kao podrške dizajnu i nabavi vojnih vozila. Prema [10], NG-NRMM uključuje popis standardiziranih preporuka (Standard Recommendations, STANREC) prema kojima se pri modeliranju treba uzeti u obzir sve geometrijske karakteristike vojnih vozila, implementirati GIS analizu, primijeniti postojeće baze podataka (npr. mjerenja sastava tla) i biti interoperabilan.

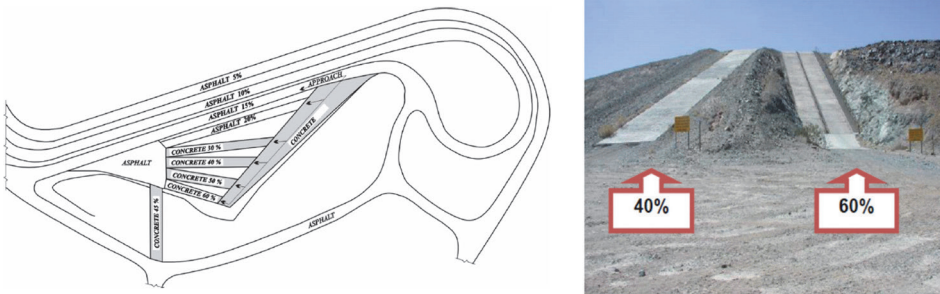
2018. provedeno je ispitivanje pokretljivosti vozila FED-Alpha (visokomobilno, dvoosovinsko, kotačno, taktičko vozilo namijenjeno za prijevoz 4 osobe, velike autonomije što se tiče potrošnje goriva) simulacijom primjenom razvijenog programskog alata, a rezultati su validirani terenskim ispitivanjima. Ispitivanje je provedeno kroz 4 faze. U prvoj fazi je bilo potrebno prikupiti taktičke tehničke i vozno dinamičke podatke testnog vozila i izraditi računalni model vozila. U drugoj fazi zadatak je bio razviti NG-NRMM proces modeliranja te izraditi i kalibrirati simulacijske modele te-

stnih događaja. U trećoj fazi provedeno je terensko ispitivanje prohodnosti vozila te su rezultati uspoređeni sa rezultatima simulacija. Na slici 4 nalazi se usporedni prikaz terenskog ispitivanja i računalne simulacije. U četvrtoj fazi analizirani su rezultati te je zaključeno da je virtualna demonstracija NG-NRMM pokazala kako je model razvio nove tehnologije, tehnike modeliranja i računalne alate kako bi omogućio fizikalnu simulaciju bilo kojeg dizajna vozila, u složenim okruženjima i scenarijima [2].



Slika 4. Usporedni prikaz terenskog ispitivanja (lijevo) i računalne simulacije (desno) [2]

NATO model je validiran, a pregled izrađenih konstrukcija za ocjenu prohodnosti vojnih vozila dan je u [11]. Pri validaciji modela razmatrane su konstrukcije za određivanje sljedećih parametara prohodnosti: udaljenost od tla, kutovi prilaska, kut uspona, minimalni radijus okretanja, širina koridora pri okretanju s minimalnim radijusom, maksimalni kutovi savladanih uspona i bočnog nagiba, najveća širina savladanog okomitog jarka, maksimalne visine prevladanog okomitog zida i stepenice, potezna sila, brzina i ubrzanje tijekom kretanja po mekom tlu i maksimalna dubina savladane vode (slika 5). Navedene sheme mogu se koristiti za izgradnju poligona za provjeru parametara prohodnosti vojnih vozila putem komparativne procjene (koja je obavezna u okviru NATO-a). Rezultati ispitivanja se mogu koristiti za definiranje mjerodavnog vozila za planiranje ruta po cestovnoj infrastrukturi. Pri planiranju ruta na operativnim razinama potrebno je definirati mjerodavno vojno vozilo, poznavati njegove vožno-dinamičke karakteristike te pronaći najbržu rutu na kojoj geometrijski elementi ceste ne utječu na proвозnost, siguran i brz prilazak mjerodavnog vozila.



Slika 5. Shema poligona za ispitivanje parametara prohodnosti (lijevo) i konstrukcija za određivanje maksimalnog kuta savladanog uspona (desno) [11]

### 3 Zaključak

U svrhu optimizacije transporta borbene tehnike i materijalnih sredstava iz područja razmještaja u područje borbenih operacija-vojnih vježbi istražuje se utjecaj vozno-dinamičkih karakteristika i geometrije kretanja vojnih vozila na operativnu pokretljivost. Razvojem GIS-a dolazi do velikog napretka u ispitivanju utjecaja terena na terensku prohodnost i pokretljivost vojnih vozila. Za vojna vozila je veća razina pokretljivosti vrlo važna jer se u svrhu obavljanja borbenih zadaća i provedbu vojnih vježbi često kreću po zahtjevnom terenu. Radi brže procjene terenske prohodnosti 70-ih godina prošlog stoljeća razvijen je NATO Model procjene pokretljivosti vozila (NRMM). U najnovijem modelu (NG-NRMM) iz 2014. primijenjene su nove tehnologije, tehnike modeliranja i računalni alati čime se omogućila simulacija različitih tipova vozila, u složenim okruženjima i scenarijima.

U nastavku istraživanja potrebno je definirati utjecaj vozno-dinamičkih karakteristika i geometrije kretanja vojnih vozila na njihovu operativnu pokretljivost. Istraživanje će uključivati definiranje mjerodavnih vojnih vozila, valorizaciju geometrijskih elemenata cesta u brdskom i planinskom terenu te utjecaj geometrijskih elemenata cesta na ograničenje prohodnosti. Cilj istraživanja je unaprjeđenje procesa utvrđivanja terenske prohodnosti, odnosno planiranja i odabira optimalne trase mjerodavnih borbenih vozila pri znatnim i velikim ograničenjima terena.

### Literatura

- [1] Heštera, H., Pahernik, M., Fizičko-geografski čimbenici terenske prohodnosti vojnih vozila prema metodologijama zapadnog svijeta, HRVATSKI GEOGRAFSKI GLASNIK 80 (2018) 2, pp. 5-31.
- [2] Mikulić, D., NATO model procjene pokretljivosti kotačnih vozila, HRVATSKI VOJNIK 115 (2006), pp. 20-21.
- [3] Nazish Khan, M., Kashif, M., Shah, A.: Off-Road Trafficability for Military Operations Using Multi-Criteria Decision Analysis, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED REMOTE SENSING AND GIS 10 (2021) 1, pp. 3425-3437.
- [4] Pahernik, M., Kereša, D., Primjena geomorfoloških istraživanja u vojnoj analizi terena - indeks zaštitnog potencijala reljefa, HRVATSKI GEOGRAFSKI GLASNIK 69 (2007) 1, pp. 41-56.
- [5] Sabolović, M., Šiljeg, A., Zdilar, S.: Značajke digitalnih modela reljefa u vojnogeografskim analizama na primjeru vojno-redarstvene operacije Maslenica, POLEMOS 18 (2015) 2, pp. 29-54.

- [6] Heštera, H.: Fizičko geografski čimbenici terenske prohodnosti vozila na kontaktnom prostoru Đakovačke lesne zaravni i pobrđa Dilj gore, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, 2021.
- [7] Dragčević, V.: Oblikovanje serpentina prema načelima geometrije kretanja, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1994.
- [8] Dragojević, M.: Borbena vozila, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, 1990.
- [9] Bradbury M., Dasch, J., Gonzalez-Sanchez, R., Hodges, H., Iagnemma, K., Jayakumar, P., Letherwood, M., McCullough, M., Priddy, J., Wojtysiak, B.: Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NRMM) Development, AVT-ET-148 Izvještaj, NATO, 2018.
- [10] Gorsich, D., Gerth, R., Bradley, S., Letherwood, M.: An Overview of the Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM) Cooperative Demonstration of Technology (CDT), Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium, Michigan, 2019.
- [11] Natriashvili, T., Dolidze, P., Kenkishvili, R., Mamaladze, V.: Research of the International Experience of Arrangement of Proving Grounds Passable Terrain for Wheeled and Tracked Military Vehicle, OBRANA I ZNANOST 1 (2022) 1, pp. 18-24.



# Usporedba i analiza pristupa stručnom nadzoru građenja u Republici Hrvatskoj, Velikoj Britaniji i Saveznoj Republici Njemačkoj

Slaven Imprić<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Mladen Vukomanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ikonart konstrukcije d.o.o., slaven.imprić@ikonart.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, mladen.vukomanovic@grad.unizg.hr

## Sažetak

Nadzorni inženjer, odnosno obveza provedbe stručnog nadzora građenja, onakvim kako ga danas u Republici Hrvatskoj propisuje Zakon o gradnji, je naslijeđena iz zakona bivše države. U postupcima javne nabave, naručitelji od nadzornog inženjera traže i očekuju mnogo više nego što to Zakon o gradnji propisuje. Provedena je analiza regulative i njene primjene na primjerima javne nabave za poslove stručnog nadzora građenja. Također, je izvršena usporedba dva potpuno različita pristupa stručnom nadzoru građenja u dvije europske države. Rezultati analiza pokazuju da je postojeća regulativa u Republici Hrvatskoj neusklađena i nedorečena te da zaostaje za razvojem društva i gospodarstva. Nužna je prilagodba stručnog nadzora građenja novim gospodarskim prilikama, novim načinima financiranja projekata i novim modelima glavnog ugovora između naručitelja i izvođača. Buduća istraživanja treba usmjeriti ka izradi smjernica za standardiziranje djelatnosti stručnog nadzora građenja primjenjivih u postupcima javne nabave.

*Key words: nadzor građenja, nadzorni inženjer, nadzor, stručni tim, voditelj projekta*

## Comparison and analysis of approaches to expert construction supervision in the Republic of Croatia, Great Britain and the Federal Republic of Germany

### Abstract

The supervising engineer, that is, the obligation to carry out professional supervision of construction, as prescribed by the Construction Act in the Republic of Croatia today, was inherited from the law of the former state. In public procurement procedures, clients ask and expect much more from the supervising engineer than the Construction Act prescribes. An analysis of the regulation and its application was carried out on examples of public procurement for expert supervision. Also, a comparison of two completely different approaches to expert supervision of construction in two European countries was made. The results of the analyzes show that the existing regulations in the Republic of Croatia are inconsistent and vague and lag behind the development of society and the economy. It is necessary to adapt professional construction supervision to new economic opportunities, new ways of financing projects and new models of the main contract between the client and the contractor. Future research should be directed towards the creation of guidelines for standardizing professional supervision activities applicable in public procurement procedures.

*Cljučne riječi: construction supervision, supervising engineer, supervision, professional team, project manager*

## 1 Uvod

Društvo je odavno prepoznalo potrebu provedbe kontrole (nadzora) postupaka građenja građevine s ciljem otklanjanja mogućnosti izvedbe radova loše kvalitete i/ili propusta izvođača u odnosu na tehničku dokumentaciju i propise, a što bi utjecalo na smanjenu uporabljivost i trajnost izvedenih radova, odnosno građevine. Zakonodavac je, svjestan te potrebe, pristupio izradi i donošenju propisa koji reguliraju prava i obveze osoba koje sudjeluju u procesu građenja. Kako su kroz povijest zakoni kreirani na nivou svake države zasebno, tako je pristup reguliraju ovog problema manje ili više različit od države do države.

Prema hrvatskoj regulativi nadzorni inženjer je jedan od sudionika u gradnji i njegov elementarni razlog postojanja je propisan Zakonom o gradnji [1], a može se sažeti u zadaću da nadzire građenje tako da bude u skladu s propisima koji uređuju gradnju građevine [2]. Nadzorni inženjer, odnosno potreba provedbe stručnog nadzora građenja, onakvim kako ga danas propisuje Zakon o gradnji, je naslijeđena iz zakona bivše države (SFRJ). Relevantni zakon iz bivše države, koji propisuje nadzor (odnosno, stručni nadzor građenja), je Zakon o izgradnji objekata iz 1975. [3], a na njega se nadovezuju Posebne uzanse o građenju iz 1977. [4] Povijesni prikaz donošenja zakona koji reguliraju područje graditeljstva i prostornog uređenja u bivšoj državi i zakona koji su ih naslijedili nakon osamostaljenja Republike Hrvatske nalazimo u radovima Kahle [5] i Rajčić, Kontrec, [6]. U bivšoj državi sustav socijalističkog upravljanja oblikovao je gospodarstvo koje je bilo orijentirano na izgradnju državnih, odnosno društvenih “investicijskih objekata”. Ekonomija je bila “dogovorna” odnosno nije se zasnivala na tržišnim načelima [7]. Od vremena kada su nastali ti prvi zakoni i propisi, u bivšoj državi, koji reguliraju područje graditeljstva do danas prošlo je gotovo 50 godina. Osamostaljenjem Republike Hrvatske prelazi se na kapitalistički sustav i tržišnu ekonomiju. Otvaraju se privatne investicije i uvode se novi načini financiranja. Hrvatska postepeno postaje dio globalnog tržišta na kojem se mijenjaju prakse i trendovi koji su usmjereni na očuvanje okoliša, zelenu gradnju i održivi razvoj, razvijaju se nove tehnologije gradnje i proizvodnje građevinskih proizvoda, izvođači postaju usko specijalizirani za određenu vrstu radova. Sukladno tome pojavljuju se novi sudionici s direktnim ili indirektnim utjecajem na proces gradnje radi postizanja svojih interesa, npr. financijeri, udruge građana, političke stranke, proizvođači građevinskih proizvoda, trgovci. Investitori imaju sve veću potrebu regulirati te procese, povećati kontrolu i smanjiti rizike u razvoju projekata. Jedan od načina, kako to riješiti, je povećanje ugovornih poslova nadzornog inženjera iznad onih koje su propisane Zakonom o gradnji. Drugi način je primjena međunarodnih modela ugovaranja za ugovore o izvođenju radova između investitora i izvođače (FIDIC, World Bank...), što posljedično, također, implicira povećanje opsega poslova nadzornog inženjera. Mogućnost da investitor nadzornom inženjeru povjeri i druge poslove, osim zakonom propisanih, bez ograničenja postavlja nadzornog inženjera

u poziciju da svojim radom prosuđuje i donosi odluke koje mogu utjecati na organizaciju građenja, na druge procese koji se odvijaju tijekom građenja, na ispunjenje vremenskih rokova, kao i na odnose među ostalim sudionicima u gradnji [8]. Zakon o gradnji [1] propisuje da je nadzorni inženjer osoba koja ima pravo uporabe strukovnog naziva ovlaštenu arhitekt ili ovlaštenu inženjer, a potrebno obrazovanje dokazuje diplomom koju je stekao na odgovarajućem tehničkom fakultetu. Studiji tehničkog smjera primarno su usmjereni na stvaranje stručnjaka koji bi bili sposobni praktično primijeniti svoje stečeno znanje, a da bi nadzorni inženjer mogao obavljati i sve druge poslove koje mu investitori može ugovorom povjeriti treba imati osnovna znanja i iz ekonomije, prava, društvenih znanosti, informatike i sl. [8].

Međutim, Zakonodavac tu ostaje neutralan. Obaveze nadzornog inženjera, prema temeljnom zakonu koji regulira gradnju, u spomenutih 50 godina, ostale su u osnovi iste. Zakon o gradnji ne prepoznaje niti novog sudionika u gradnji koji je 2008. godine uveden kroz Zakon o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju [9], a od 2015. godine zamijenjenog sa Zakonom o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje [10]. Novi sudionik u gradnji je voditelj projekta koji upravlja projektom gradnje. Neusklađenost tih zakona, ali i nedovoljno jasno postavljene granice između obaveza nadzornog inženjera i voditelja projekta, što ostavlja mogućnost različitog tumačenja područja njihovog djelovanja i odgovornosti, u praktičnoj primjeni rezultiraju preklapanjem tih poslova. Opisi poslova nadzornog inženjera i voditelja projekta definiranih zakonom se kod ugovaranja s investitorom/naručiteljem proširuju s dodatnim poslovima. Upravo potrebe investitora/naručitelja da proces gradnje imaju pod kontrolom rezultiraju tim dvostrukim ugovaranjem istih obaveza. Analiza preklapanja poslova nadzornog inženjera i voditelja projekta, na primjerima iz prakse u Republici Hrvatskoj, obrađena je u specijalističkom radu Jergović Šindler [11]. Također, preklapanje poslova nadzornog inženjera i voditelja projekta s naglaskom na potrebu standardiziranja djelatnosti upravljanja projektima u RH analizira Perić [7, 12].

Ovdje u uvodu je istaknut problem pozicije i funkcije nadzornog inženjera kao jednog od sudionika u građevinskom projektu. Povijest stručnog nadzora građenja u Hrvatskoj je kratka, ali su se u tom periodu dogodile značajne društvene i gospodarske promjene, a stručni nadzor građenja se nije mijenjao, odnosno regulativa je ostala gotovo ista. U nastavku ovog rada je izrađena analiza hrvatske regulative te su detektirane neusklađenosti i nedorečenosti zakona i podzakonskih akata za područje stručnog nadzora građenja, a kroz analizu tri studije slučaja javne nabave stručnog nadzora građenja u Hrvatskoj, pokazano je kako (javni) naručitelj gleda na nadzornog inženjera danas.

Izrađena je analiza dva potpuno različita pristupa stručnom nadzoru građenja u dvije europske države, u Velikoj Britaniji i Saveznoj Republici Njemačkoj. Ukratko su iznijete povijesne prilike koje su dovele do takvih različitih pristupa, ali i prilagodbe i razvoj kroz razvoj društva i gospodarstva. Nakon toga je dana usporedba analiziranih pristupa struč-



nom nadzoru građenja, što je dobro u Velikoj Britaniji i Saveznoj Republici Njemačkoj i kako to primijeniti u Hrvatskoj, a na kraju je iznijet zaključak i preporuka koja istraživanja provesti i kako potaknuti “evoluciju” stručnog nadzora građenja u Hrvatskoj.

## **2 Uloga nadzornog inženjera prema hrvatskoj regulativi**

### **2.1 Nadzorni inženjer / nadzor / stručni nadzor građenja – pregled hrvatske regulative**

Pojmovi nadzorni inženjer, nadzor i stručni nadzor građenja su prisutni u hrvatskoj regulativi u Zakonu o gradnji [1], Zakonu o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje [10] i Zakonu o obveznim odnosima [13]. U praksi sva tri pojma imaju isto značenje, odnosno tumače se jednako. S druge strane navedena tri zakona vide razliku između ta tri pojma, ali i među tim zakonima postoji neusklađenosti. Tko je zapravo nadzorni inženjer?

### **2.2 Zakon o gradnji (ZoG)**

Zakon o gradnji [1] je temeljni zakon koji, među ostalim, regulira odnose i obveze svih sudionika u gradnji, a to su investitor, projektant, izvođač, nadzorni inženjer i revident (slika 1.). Zakon obvezuje investitora da projektiranje, kontrolu, građenje i stručni nadzor građenja povjeri osobama koje ispunjavaju uvjete za to. Nadzorni inženjer je fizička osoba koja prema posebnom zakonu ima pravo uporabe strukovnog naziva ovlaštenu arhitekt ili ovlaštenu inženjer i provodi u ime investitora stručni nadzor građenja. Način provedbe stručnog nadzora građenja propisan je Pravilnikom o načinu provedbe stručnog nadzora građenja, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera (Pravilnik) [14], kao podzakonskog akta Zakona o gradnji. Isti Pravilnik u članku 10. propisuje da osim poslova stručnog nadzora građenja, nadzorni inženjer smije obavljati i druge poslove koje mu ugovorom povjeri investitor u skladu s propisima. Pri tome te poslove nadzorni inženjer ne smije obavljati na način koji bi ugrozio svoju neovisnost i nepristranost u ispunjavanju obveza koje ima prema Zakonu o gradnji.

Ovdje treba istaknuti dva podatka. Prvo, Pravilnik propisuje, osim poslova stručnog nadzora građenja, i druge poslove nadzornog inženjera. Drugo, Pravilnik ističe neovisnost i nepristranost nadzornog inženjera, a zakon propisuje da nadzorni inženjer provodi stručni nadzor građenja u ime investitora.

Također, treba istaknuti podatak da Zakon o gradnji, opisuje i pojam nadzor, koji podrazumijeva nadzor nad provedbom Zakona o gradnji, odnosno inspeksijski nadzor. Poseban dio nadzora koji se odnosi na provedbu obveza sudionika u gradnji provodi građevinska inspekcija. Dakle, stručni nadzor građenja i nadzor, prema Zakonu o gradnji, su dva različita pojma.

## 2.3 Zakon o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje(ZoP i DPUiG)

Ovaj Zakon [10] ne uređuje obaveze Investitora kao jednog od sudionika u gradnji prema Zakonu o gradnji, ali uvodi poziciju voditelja projekta (slika 2.) koji obavlja poslove upravljanja projektom gradnje, u ime i za račun investitora. Voditelj projekta je predstavnik investitora koji ima potrebne vještine i znanja za upravljanje projektom gradnje, jer, najčešće, investitor to sam nema. Investitor koji je javni naručitelj je obavezan imenovati voditelja projekta samo za određene građevine propisane Zakonom. Za ostale građevine i kod privatnih investitora ne postoji zakonska obaveza imenovanja voditelja projekta.

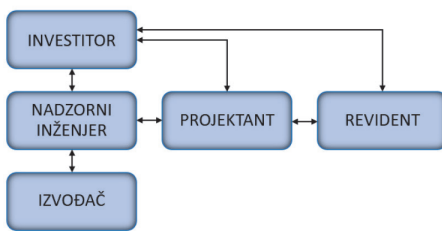
Pod obavljanjem poslova stručnog nadzora građenja, ovaj Zakon podrazumijeva obavljanje svih poslova koje, prema Zakonu o gradnji, obavlja nadzorni inženjer.

## 2.4 Zakon o obveznim odnosima (ZoOO)

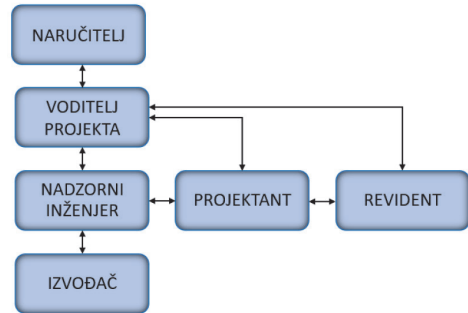
Zakon o obveznim odnosima [13], među ostalim, regulira ostvarivanje prava i obaveza ugovornih strana u različitim poslovima pa tako kod općih odredbi ugovora o građenju regulira odnos između izvođača i naručitelja. U ovom Zakonu u poglavlju "Ugovor o građenju" nalazimo pojam nadzor u članku 622., koji glasi: "Izvođač je dužan omogućiti naručitelju stalan nadzor nad radovima i kontrolu količine, kakvoće i sukladnosti ugrađenih proizvoda" [13].

Iako ovaj Zakon nigdje ne spominje stručni nadzor građenja, u praksi primjena članka 622. jest izjednačavanje pojma nadzor s pojmom stručni nadzor građenja. Suprotno tome, u točki 2.2. ovog rada, je naglašeno da su prema Zakonu od gradnji nadzor i stručni nadzor građenja dva različita pojma. Daljnja primjena u praksi, iste odredbe ovog Zakona, je da nadzor, odnosno stručni nadzor građenja, u ime naručitelja (investitora) provodi nadzorni inženjer, jer naručitelj nije educiran za to. Nadalje, prema članku 622. naručitelj provodi kontrolu količina, kakvoće i sukladnosti ugrađenih proizvoda. Iz istog razloga, u praksi, u ime naručitelja te poslove obavlja nadzorni inženjer. Pri tome kontrola kakvoće i sukladnosti ugrađenih proizvoda je dio poslova stručnog nadzora građenja, prema Zakonu o gradnji, a kontrola količina pripada u one druge poslove koje ugovorom može investitor (naručitelj) povjeriti nadzornom inženjeru.

Na kraju, prema ovom Zakonu naručitelj provodi nadzor, odnosno, u njegovo ime nadzorni inženjer, a to znači da nadzorni inženjer nije nepristran i neovisan.



Slika 1. Sudionici u gradnji – ZoG



Slika 2. Sudionici u gradnji - ZoP i DPUiG

## 2.5 Drugi poslovi nadzornog inženjera koje mu ugovorom povjeri investitor

Zakon o gradnji [1] propisuje obveze nadzornog inženjera u provedbi stručnog nadzora građenja s naglaskom na kontrolu kvalitete radova tijekom građenja. Pravilnik [14], međutim, otvara mogućnost investitoru da nadzornom inženjeru povjeri i druge poslove osim stručnog nadzora građenja, ali pri tome eksplicitne ne opisuje koji su to drugi poslovi. U prethodnoj točki 2.4. u Zakonu o obveznim odnosim je naveden jedan od “drugih” poslova nadzornog inženjera, kontrola količina. U Posebnim uzancama o građenju [15] u točki 84. se navodi kako “Naručitelj ima pravo imenovati osobu koja vrši stručni nadzor radi provjere i osiguranja urednog izvršenja radova, osobito glede vrsta, količina i kvalitete radova, materijala i opreme te predviđenih rokova”. Tu je naveden još jedan od “drugih” poslova nadzornog inženjera, provjera i osiguranje urednog izvršenja radova u predviđenim rokovima. Niti jedan drugi zakon ili podzakonski akt ne navodi koji su to još “drugi” poslovi nadzornog inženjera.

## 2.6 Zaključak nakon pregleda hrvatske regulative

Pregled i usporedba tri zakona i njihovih podzakonskih akata vodi zaključku da među njima postoji neusklađenost. Zakon o gradnji i Zakon o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje prepoznaju investitora dok se u drugim aktima spominje naručitelj, koji nije nužno investitor. Zakon o gradnji ne prepoznaje voditelja projekta koji je kao novi sudionik u gradnji uveden u Zakonu o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje. Nadzorni inženjer, nadzor i stručni nadzor građenja su pojmovi koji su različito definirani u ova tri zakona. Nadzorni inženjer nije nepristran i neovisan, jer treba zastupati investitora/naručitelja, a uz stručni nadzor građenja nadzornom inženjeru se mogu dodijeliti i drugi poslovi. Koji drugi poslovi, niti jedan zakon niti podzakonski akt ne daje jasne kriterije, ali ne postoji niti zakonska zapreka da naručitelji proširi popis poslova nadzornog inženjera prema svojim potrebama, vodeći se pravilom da sve što nije suprotno zakonu je u skladu

sa zakonom. Kako se ove neusklađenosti i nedorečenosti zakona manifestiraju u praksi, analizirano je u tri studije slučaja.

## 2.7 Studija slučaja – poslovi nadzornog inženjera

U postupcima javne nabave, investitor (odnosno naručitelj) od nadzornog inženjera traži i očekuje mnogo više nego to Zakon o gradnji propisuje. Obzirom da Pravilnik to dopušta, investitori (naručitelji) proširuju popis poslova nadzornog inženjera prema svojim potrebama. U nastavku je analiza tri studije slučaja javnih poziva za stručni nadzor građenja objavljenih kroz portal Elektronički oglasnik javne nabave (EOJN).

**Slučaj 1.:** Dokumentacija o nabavi – Usluge nadzora nad provedbom projekta Izgradnja i rekonstrukcija vodno-komunalne infrastrukture Aglomeracija Slatina – Knjiga 3 – Projektni zadatak (KOMRAD d. o. o., Slatina) [16]

Obveze izvršitelja (izdvojeno): Svi zadaci nadzora izvodit će se poštujući zahtjeve hrvatskog i europskog zakonodavstva. U okviru ovog Ugovora, Izvršitelj je dužan ispuniti sljedeće:

- obveze Inženjera definirane Uvjetima ugovora o građenju (FIDIC Crvena i Žuta knjiga),
- obveze nadzornih inženjera kako je definirano Zakonom o gradnji (NN 153/13, 20/17) i Zakonom o poslovima prostornog uređenja i gradnje (NN 78/15, 65/17),
- nadzor nad izradom projektne dokumentacije od strane Izvođača u ugovorima koji su predmet usluga nadzora
- sve ostale obveze definirane ovim Projektnim zadatkom.

Izvršitelj je dužan vršiti obveze i nadležnosti Inženjera te nadzornog inženjera kako je to navedeno, ili se može protumačiti iz Ugovora, kao i provoditi odredbe Ugovora, rješavajući situacije u skladu s Ugovorom, uzimajući u obzir sve relevantne okolnosti.

Pomoći Naručitelju oko pregleda i odobrenja svih potrebnih potvrda, jamstava, polica osiguranja itd. za početak građevinskih radova.

Potvrditi Plan utroška novčanih sredstava radova s Naručiteljem i Izvođačima.

Pomoći Naručitelju u promoviranju Projekta kako bi se ispunili zahtjevi EU o komunikaciji i vidljivosti.

Provoditi nadzor na licu mjesta, koordinaciju i administraciju ugovora, kako bi se osigurala usklađenost radova i opskrbe s ciljevima, projektima, vremenskim planom, te izvješćivanjem, troškovima, kvalitetom, testiranjem, ekološkim, sigurnosnim i svim ostalim zahtjevima ugovora te postigla svrha projekta.

Inicirati, voditi i koordinirati sastanke na lokaciji te sastanke vezanim uz mjesečni napredak radova; pravovremeno pripremati i izdavati zapisnike s tih sastanaka te osiguravati da se sva nastala pitanja brzo rješavaju.

Pružati pomoć na zahtjev Naručitelja telefonom/faksom/elektroničkom poštom o bilo kojem pitanju u vezi s provedbom ugovora, uključujući ad hoc izvješća.

Provjeravati i odobravati dokumente o izvedenom stanju i ostale građevinske dokumente koje zahtijeva hrvatsko zakonodavstvo, priručnike za rad i održavanje pojedinih postrojenja ili strojeva, popis rezervnih dijelova i ostalu dokumentaciju te također pratiti isporuku svih izvješća, atesta, zapisa, potvrda o sukladnosti itd. pripremljenih ili dostavljenih od strane Izvođača, osiguravajući da su u potpunosti ujednačeni, indeksirani i pravilno prezentirani.

Odobravati program pokusnog rada, puštanje u pokusni rad i faze pokusnog rada.

Sudjelovati u pripremi elaborata za prijavu pokusnog rada.

Kontrolirati i potvrđivati izrađeni program obuke i provedbu obuke osoblja Naručitelja koju provodi Izvođač.

**Slučaj 2.:** Dokumentacija o nabavi – za provedbu otvorenog postupka javne nabave za nabavu usluge stručnog nadzora nad radovima na energetskej obnovi zgrade Srednje škole Vrbovec, Zagrebačka županija [17]

Opis predmeta nabave (izdvojeno): Osim aktivnosti određenih člankom 58. Zakona o gradnji ("Narodne novine", broj 153/13, 20/17 i 39/19), nadzorni inženjer dužan je kontrolirati obračun izvedenih radova, investitora mjesečno pisano izvješćivati o izvedenim radovima, pisano pravovremeno obavještavati Naručitelja o problemima vezanim za izvođenje radova te dati mišljenje i pojasniti moguće situacije u svezi s time.

Sadržaj usluga nadzora građenja obuhvaća uz zakonske obveze i:

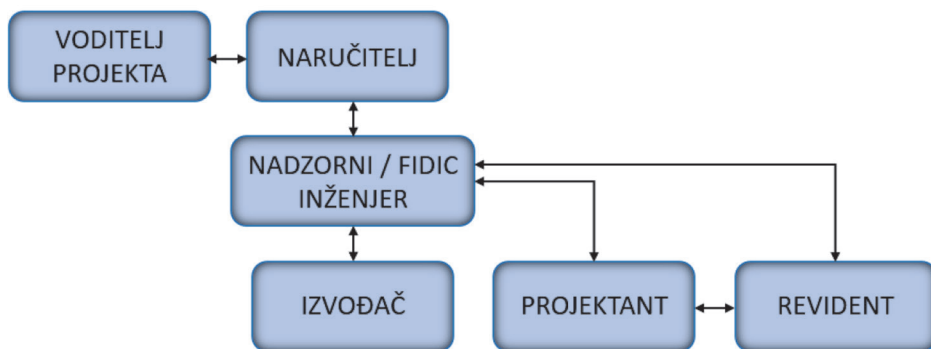
- provjeru trošenja sredstava po namjeni, dinamici i visini (kontrola: izmjera, građevinske knjige, situacija, proračuna razlike u cijeni, obračuna nepredviđenih i naknadnih radova, realizacije planirane dinamike financiranja, utroška sredstava u odnosu na postavke iz investicijskog programa, režijskih sati radnika i mehanizacije, poduzimanje odgovarajućih mjera ako se ocijeni da će doći do prekoračenja investicijskog iznosa);
- verificirati Terminski plan gradnje i Financijski plan gradnje koji je izradio Izvoditelj radova,
- davanje uputa Izvršitelju i staranje za ispravno kvalitetno i što ekonomičnije izvođenje radova prema odobrenim projektima i eventualnim naknadnim izmjenama i dopunama, a u skladu sa suvremenom tehnologijom građenja,
- važećim propisima, normama i standardima,
- koordinirati sve sudionike u gradnji, koji su u neposrednoj ugovornoj obvezi s Naručiteljem,
- pravovremeno davati potrebna objašnjenja projekta i ostale dokumentacije na gradilištu te rješavati pojedine detalje izvedbe na zahtjev Izvođača i to u suradnji i uz suglasnost projektanta putem Građevinskog dnevnika,
- kontrola dodatnih nacrtanih detalja koji nisu obuhvaćeni glavnim projektom ako se za istim ukaže potrebe,

**Slučaj 3.:** Dokumentacija o nabavi – za provedbu postupka javne nabave za nabavu usluge “Stručni nadzor nad radovima na energetskej obnovi zgrade Doma za starije osobe Bjelovar”, Dom za starije osobe Bjelovar [18]

Opis predmeta nabave (izdvojeno): Gospodarski subjekt je prilikom pružanja usluge koja je predmet ove nabave dužan pridržavati se pravila struke, odnosno Zakona o gradnji (NN, 153/13, 20/17 i 39/19), Zakona o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje (NN, 78/15 i 118/18), Pravilnika o načinu provedbe stručnog i obračunskog nadzora građenja, obrascu, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera (NN, 111/14, 107/15 i 20/17).

Zbog ograničene veličine dokumenta ovdje je za sva tri slučaja izdvojen samo dio iz popisa poslova ili opisa predmeta nabave za nadzornog inženjera. Cjeloviti dokumenti dostupni na portalu EOJN.

U sva tri slučaja, osim prema Zakonu o gradnji, popis poslova nadzornog inženjera je proširen na druge poslove. To proširenje popisa s drugim poslovima je različito za različite vrste građevina. Obzirom da zakonom nisu postavljena ograničenja koji to drugi poslovi mogu biti, naručitelji koristeći tu mogućnost, nadzornim inženjerima dodjeljuju i poslove drugih sudionika u gradnji. Najzastupljeniji su poslovi upravljanja projektom koje obavlja voditelj projekta gradnje (verificirati terminski i financijski plan gradnje., koordinirati sve sudionike u gradnji...), zatim poslovi projektiranja koje obavlja projektant (u slučaju potrebe za izmjenom dijela projektnih rješenja, nadzorni inženjer je dužan iste projektno obraditi...), te poslovi koji pripadaju u obaveze investitora/naručitelja (pomoći naručitelju u promoviranju projekta...) (slika 3.).



Slika 3. Sudionici u gradnji kako ih vidi javni naručitelj

Nadalje, u slučaju 1. je za glavni ugovor o građenju korišten FIDIC model ugovaranja u kojem postoji funkcija inženjera kao predstavnika naručitelja[12]. U ugovoru za stručni nadzor poslovi inženjera su dodani poslovima nadzornog inženjera što potencijalno stvara sukob interesa, jer spajanjem tih dviju pozicija nadzorni inženjer

postaje predstavnik investitora. U Slučaju 3. naručitelj javne nabave mijenja naziv Pravilnika (*...stručnog i obračunskog nadzora građenja...*) kako bi ga prilagodio svojim potrebama.

Javni naručitelji se nalaze u povlaštenoj poziciji kod sastavljanja dokumentacije o nabavi i imaju neograničenu slobodu u izradi popisa poslova nadzornog inženjera. Također, postoji sloboda i u načinu pisanja, a rezultat je da su rečenice koje opisuju poslove nadzornog inženjera predugačke, komplicirane i nerazumljivo sastavljene. Zadaci i upute su isprepleteni i ponavljaju se. Koriste se izrazi kao što su “svim ostalim zahtjevima” i “ostale građevinske dokumente” čime opis poslova postaje neodređen. Javni naručitelj želi od nadzornog inženjera dobiti maksimalnu uslugu za jedinstvenu cijenu pa u popis poslova nadzornog inženjera dodaje i one koji nikada ne će biti izvršeni i ne bi niti trebali biti na popisu. Dojam je da je nadzorni inženjer najkompetentnija osoba u gradnji građevine. Dužan je kontrolirati sve druge sudionike u gradnji, detektirati njihove pogreške i ispraviti te pogreške i/ili odrađivati poslove koje oni nisu odradili. Razumljiv je cilj naručitelja da unaprijed detektira i eliminira sve rizike koji mogu dovesti do loše kvalitete radova, prekoračenja rokova ili povećanja investicije na način da ih sve kontrolira nadzorni inženjer, ali kod izrade opisa poslova nadzornog inženjera odlazi se u krajnosti na način da se ti poslovi isprepliću s poslovima drugih sudionika u gradnji, a esencijalni razlog postojanja nadzornog inženjera postaje minoran.

S druge strane, postavlja se pitanje, traže li javni naručitelji pomoć u sastavljanju popisa poslova stručnog nadzora građenja, odnosno trebaju li njima gotovi standardizirani obrasci s popisom poslova stručnog nadzora građenja prilagođeni glavnom ugovoru između naručitelja i izvođača i prilagođeni vrsti građevine koja se gradi?

### **3 Stručni nadzor građenja u Velikoj Britaniji**

John Uff u svojem dvanaestom izdanju Građevinskog prava (Construction law) [19] precizno opisuje pravni sustav u Velikoj Britaniji te pojašnjava područje Građevinskog prava navodeći niz primjera iz prakse. Njegov rad je korišten kao osnovni izvor informacija bitnih za analizu građevinske struke u Velikoj Britaniji.

Pravni sustav u Velikoj Britaniji temelji se na običajnom pravu. Stvorili su ga kraljevi suci u dvanaestom i trinaestom stoljeću, a razvijao se i prenosio do danas. Bitna značajka običajnog prava koja ga razlikuje od drugih pravnih sustava jest da se temelji na presedanu koji se razvija, bez pisanih načela iz kojih presedan proizlazi. Suci stvaraju zakon kad god donesu presudu. Pokazalo se da je običajno pravo izvanredno fleksibilan instrument, sposoban za brzu prilagodbu potpuno novim okolnostima. Radi “kodifikacije” odluka sudaca i pojašnjenja običajnog prava Pravna komisija, kao statutarno tijelo, izrađuje izvješća, te priprema statute koji postaju zakon kada ih potvrdi Parlament. Od sedamnaestog stoljeća Parlament ima vrhovnu vlast. Građevinsko pravo (Construction Law) je pojam koji pokriva cijelo područje prava koje

izravno utječe na građevinsku industriju, a sastoji se od šest glavnih tijela zakona. Glavne strane uključene u građevinski projekt su naručitelj, izvođač i stručni tim. Stručni tim su arhitekti, inženjeri građevinarstva, strojarstva i elektrotehnike, geodeti, voditelji projekta i dr. Veliki dio građevinskih projekata u Velikoj Britaniji još uvijek se izvodi prema sustavu koji se naziva tradicionalno generalno ugovaranje. Prema ovom sustavu osoba koja izvodi radove je glavni izvođač ili graditelj ili izvođač građevinskih radova. Naručitelj (klijent) i glavni izvođač su dvije strane u glavnom ugovoru koji se može nazvati ugovor o građenju. Stručne usluge koje uključuju projektiranje i stručni nadzor građenja pružaju druge osobe koje mogu biti navedene u glavnom ugovoru, ali nisu njegove stranke. Njihov odnos je poseban ugovor s naručiteljem. U tradicionalnom generalnom ugovaranju projektiranje i stručni nadzor građenja provodi ista osoba, inženjer i/ili arhitekt. U svom djelovanju, sukladno glavnom ugovoru, oni ponekad djeluju kao agenti naručitelja, zastupaju njegove interese i upravljaju izvođenjem radova, dok u drugim situacijama kada se traži njihovo profesionalno mišljenje moraju nastupiti nepristrano između dviju glavnih ugovornih strana. U novije vrijeme pojavljuju se niz alternativa u odnosu na tradicionalno generalno ugovaranje. To su ugovori "projektiranje i izgradnja" (design and build) ponekad nazvani "ključ u ruke" u kojima izvođač preuzima odgovornost za projektiranje. Poseban oblik ugovaranja poznat kao BOOT (Build-Own-Operate-Transfer) je metoda ugovaranja gdje vlasnik ne financira izgradnju već daje koncesiju projektnoj tvrtki. Projektna tvrtka prikuplja sredstva, preuzima projekt i uzima prihod tijekom razdoblja koncesije. Takvi projekti uključuju osim izgradnje i upravljanje građevinom tijekom njenog korištenja do otplate koncesije. Sve navedene promjene rezultirale su mnogo većom fluidnošću unutar tradicionalnih strana u projektima, s financiranjem koje ponekad osiguravaju izvođač i projektant, uz tradicionalne naručitelje, a svi oni sudjeluju u rizicima i dobiti projekta. Noviji oblici ugovaranja radova, prema kojima se uloge strana razlikuju od tradicionalnog generalnog ugovaranja, dovode do pojave novog stručnjaka poznatog kao voditelj projekta. Voditelj projekta je posvećen kontroli troškova, vremena i specifikacija. Njegova pozicija je različita ovisno o obliku glavnog ugovora. Može imati poseban ugovor s naručiteljem, a može biti imenovan i od izvođača.

U Velikoj Britaniji korištenje standardnih obrazaca ugovora o izgradnji seže više od sto godina unatrag. Glavno tijelo koje izrađuje i objavljuje standardne obrasce ugovora, smjernice i drugu dokumentaciju za korištenje u građevinskoj industriji je Joint Contracts Tribunal (JCT). Njihov glavni rival je New Engineering Contract (NEC) i njegov paket Engineering and Construction Contracts (ECC) koji je odobrila Vlada Velike Britanije i sada se sve više koristi u državnim investicijama. U VB se rijetko koriste FIDIC modeli ugovaranja [20].

Glavna stručna tijela koja promiču rad inženjera i arhitekata također izrađuju ugovore za imenovanje svojih članova za pružanje usluga projektiranja i/ili savjetovanja. Standardni modeli ugovaranja za glavne ugovore i odgovarajući modeli ugovaranja



za inženjere i arhitekta, odnosno stručni tim, jasno određuju poziciju u projektu svakog od sudionika. Obaveze sudionika u gradnji nisu predodređene zakonom već se definiraju ugovorom.

#### **4 Stručni nadzor građenja u Saveznoj Republici Njemačkoj**

U Saveznoj Republici Njemačkoj jedinstveni nacionalni zakon o gradnji (njem. Baugesetzbuch) [21, 22] obrađuje područje prostornog uređenja, a na nivou svake savezne države postoje Građevinski propisi (njem. Bauordnung) [23] koji obrađuje područje gradnje. Iako postoji 16 saveznih država razlike u građevinskim propisima gotove i nema, jer se donose prema Modelu koji propisuje Ministarstvo graditeljstva. Građevinskim propisima uređen je nadzor gradnje kroz postupak ishođenja građevinske dozvole i organizacije kontrole građenja (stručni nadzor građenja).

Korijeni današnjih građevinskih propisa sežu unatrag do "Zahtjeva za zgrade" koji su doneseni unutar zanatskih udruga kao što su cehovi i graditelji crkava. S rastom gradova povećavali su se sigurnosni zahtjevi za zgrade. Osobito se znatno povećao rizik od požara. Kako bi se tome suprotstavili, u kasnom srednjem vijeku stvoreni su urbani građevinski zakoni. U razdoblju apsolutizma došlo je do pomaka u zakonodavstvu s općina na države, a dizajn zgrada dobiva sve veću važnost u građevinskim propisima. Sve do 1980-ih bilo je zastupljeno načelo prevencije putem nadzora od strane javnog sektora. Nakon toga, u sklopu smanjenja birokracije, uveden je niz izmjena građevinskih propisa kojima se dopušta veća osobna odgovornost, odnosno odgovornost za poštivanje propisa leži na naručitelju, uz potporu ovlaštenih osoba [23].

Prema važećim građevinskim propisima naručitelj je odgovoran za realizaciju građevinskog projekta. On mora biti vlasnik ili korisnik zemljišta [24]. Za realizaciju projekta naručitelj treba angažirati projektanta i izvođača. Tijela za nadzor gradnje su niža građevinska nadzorna tijela u odjelima okruga, viša građevinska nadzorna tijela su vlade, a najviše građevinsko nadzorno tijelo je Ministarstvo graditeljstva [25, 26]. Za provedbu građevinskih propisa i drugih javnopravnih propisa za izgradnju, promjenu, prenamjenu i uklanjanje, kao i za uporabu i održavanje građevina, nadležno je niže građevinsko nadzorno tijelo. Nadzor nad gradnjom provodi se kroz postupak ishođenja građevinske dozvole i kroz postupak kontrole građenja (stručni nadzor građenja). Tijelo za nadzor gradnje u slučaju kršenja javnopravnih propisa može izreći mjere zabrane korištenja nezakonito označenih građevinskih proizvoda, obustavu radova, uklanjanje nezakonito izvedenih radova, zatvaranje gradilišta, te zabranu korištenja građevine ukoliko se koristi protivno namjeni [25]. Prema posebnom Pravilniku kojeg donosi Ministarstvo, u ime tijela za nadzor gradnje, prema načelu četiri oka, odnosno dvostruke kontrole, inženjeri za ispitivanja provjeravaju primjenu propisa u pogledu stabilnosti konstrukcije i zaštite od požara [27]. Inže-

njer za ispitivanja je integriran u službenu proceduru kao poduzetnik s povjerenjem, djeluje kao suveren i podvrgnut je tehničkom nadzoru najviših organa građevinske kontrole. Pravilnik kojim se uređuje djelatnost inženjera za ispitivanja regulira uvjete i postupak stjecanja ovlaštenja, postupke za izvršenje zadataka i naknadu [25]. Nadzor nad gradnjom u potpunosti je reguliran zakonom. Ne postoji ugovorni odnos između naručitelja i nadzora.

## 5 Diskusija: Suvremeni pristup razvoju stručnog nadzora građenja

Analizom hrvatske regulative utvrđen je niz neusklađenosti između tri zakona koji propisuju stručni nadzor građenja. Posljedično neusklađenost naručitelje navodi na pogrešnu primjenu zakona i podzakonskih akata, a u ovom radu je pokazano kako se to odnosi na ugovaranje stručnog nadzora građenja u postupcima javne nabave. Istaknuto je da su gospodarske prilike u vrijeme izrade prvih zakona o stručnom nadzoru građenja, u bivšoj državi, bile bitno drugačije od danas, a da je uloga nadzornog inženjera ostala ista. Upravo zato, zahtjevi javnih naručitelja prema nadzornim inženjerima, u aktualnim gospodarskim prilikama, pokazuju da zakon treba korigirati, ali i to da zakon nije dovoljan, već za ugovaranje stručnog nadzora građenja treba postojati popis poslova prilagođen modelu glavnog ugovora između naručitelja i izvođača i vrsti građevine.

Što možemo korisnog primijetiti u pristupu stručnom nadzoru građenja u Velikoj Britaniji i SR Njemačkoj?

U tim državama zakonodavstvo je počelo i razvijalo se na bitno različite načine. Međutim, zajednički nazivnik je razvoj. Razvoj društva općenito, razvoj gospodarstva, nove tehnologije, sve to stvara nove prilike, a time i nove potrebe. U obje te države stručni nadzor građenja i regulativa koja propisuje stručni nadzor građenja je imala evoluciju i imati će ju i dalje. Suprotno tome stručni nadzor građenja u Hrvatskoj i regulativa koja ga propisuje je u 50 godina svog postojanja ostala nepromijenjena. Cilj ovog rada jest pokrenuti razvoj stručnog nadzora građenja iz njegove početne točke. Usklađenje zakona i podzakonskih akata je nužno, ali nije dovoljno za jedan takav pomak. Zakon (i podzakonski akti) trebaju biti platforma koja će jasno definirati poziciju i funkciju nadzornog inženjera u procesu gradnje, kao i svih ostalih sudionika u gradnji.

Prilagodba stručnog nadzora građenja novim gospodarskim prilikama, novim načinima financiranja projekata i novim modelima glavnog ugovora između naručitelja i izvođača treba biti usmjerena na standardiziranje poslova stručnog nadzora građenja ili na izradu standardnih modela ugovaranja. Pri tome treba uzeti u obzir različite vrste građevina. Na taj način bi se javnim naručiteljima (i naručiteljima općenito) dala kvalitetna podloga za ugovaranje stručnog nadzora građenja, bez potrebe da sami preispituju važnost uloge nadzornog inženjera i na koje sve načine bi im on mogao biti koristan u realizaciji projekta.

## 6 Zaključak

Hrvatsku regulativu, zakone i podzakonske akte, treba uskladiti. Nadzorni inženjer, nadzor i stručni nadzor građenja moraju na jednaki način biti definirani u svim zakonima, voditelj projekta, također, a poslove nadzornog inženjera i voditelja projekta treba jasno propisati. To je posao zakonodavca na koga se s ove pozicije ne može direktno utjecati, ali strukovna udruženja to moraju prva prepoznati i svojim radom potaknuti promjene u pravom smjeru. Ovaj rad ukazuje na problem koji postoji i podloga je za daljnje aktivnosti.

Nadalje, u postavkama pozicije nadzornog inženjera treba razlučiti zabludu o nepristranosti i neovisnosti. Nadzorni inženjer je angažiran od strane investitora/naručitelja, isto kao i projektant, revident i voditelj projekta. Međutim, svatko od njih je dužan provoditi zakon i poštivati struku. Znanje i odgovornost trebaju biti garancija za izvršavanje obaveza.

Buduća istraživanja treba usmjeriti u izradu smjernica za standardiziranje djelatnosti stručnog nadzora građenja primjenjivih u postupcima javne nabave. Pri tome treba uzeti u obzir različite vrste građevina i različite modele glavnih ugovora između naručitelja i izvođača. Evidentno je da u tom području postoji praznina. Javni naručitelji sami iznalaze za to rješenja koja nisu dobra. Struka treba na to dati odgovor.

## Literatura

- [1] Zakon o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19), [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019\\_12\\_125\\_2489.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_12_125_2489.html)
- [2] Fučić, L.: Zadaće nadzornog inženjera, Polytechnic & design Vol. 2, No. 1, pp 79-83, DOI: 10.19279/TVZ. PD.2014-2-1-09
- [3] Zakon o izgradnji objekata (Službeni list SFRJ 1975.), <https://www.iusinfo.hr/zakonodavstvo/ZA1975B20A245/clanak-64>
- [4] Posebne uzanse o građenju (Službeni list SFRJ 18/77), [https://www.eurokvadrat.com/zakoni/posebne\\_uzanse\\_o\\_gradjenju.pdf](https://www.eurokvadrat.com/zakoni/posebne_uzanse_o_gradjenju.pdf)
- [5] Kahle, D.: Građevni i urbanistički propisi u Hrvatskoj od 1956. do 1971. godine, Časopis za suvremenu povijest, br.3, pp 1149-1181, DOI: <https://doi.org/10.22586/csp.v53i3.17912>
- [6] Rajčić D., Kontrec D.: Povijesni prikaz donošenja propisa iz područja graditeljstva i prostornog uređenja, 11. OTMC Konferencija, pp 254-266 <https://www.huog.hr/otmc-2013>
- [7] Perić, R., Vukomanović M.: Standardiziranje usluga upravljanja projektima gradnje investitorima obveznicima javne nabave u Republici Hrvatskoj, 6. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, pp 33-44, DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2020.03>

- [8] Ević E., Anton H., Čilić D.: Supervising engineer role within the construction process, 8. OTMC Konferencija, <https://www.huog.hr/otmc-2008>
- [9] Zakon o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju (NN 152/08), [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008\\_12\\_152\\_4148.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_12_152_4148.html)
- [10] Zakon o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje (NN 78/2015, 118/18, 110/19), [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019\\_11\\_110\\_2215.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_11_110_2215.html)
- [11] Jergović Šindler, I.: Analiza preklapanja opsega usluga upravljanja projektom i nadzora u provedbi projekata Aglomeracija, Specijalistički rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [12] Perić, R., Vukomanović M.: Djelatnost upravljanja projektom gradnje u Republici Hrvatskoj: analiza trenutačnog stanja, Građevinar, 74 (9), pp 749-767, DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.3424.2021>
- [13] Zakon o obveznim odnosima (NN 35/05), [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2005\\_03\\_35\\_707.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2005_03_35_707.html)
- [14] Pravilnik o načinu provedbe stručnog nadzora građenja, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera (NN 131/21, 68/22), [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022\\_06\\_8\\_1010.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_06_8_1010.html)
- [15] Posebne uzance o građenju, (NN 137/20), HGK i HUP, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_12\\_137\\_2270.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_12_137_2270.html)
- [16] Komrad d. o. o., Slatina: Dokumentacija o nabavi – Usluge nadzora nad provedbom projekta Izgradnja i rekonstrukcija vodno-komunalne infrastrukture Aglomeracija Slatina – Knjiga 3 – Projektni zadatak, Dostupno na: <https://eojn.nn.hr/Oglasnik/>
- [17] Zagrebačka županija, Zagreb: Dokumentacija o nabavi – za provedbu otvorenog postupka javne nabave za nabavu usluge stručnog nadzora nad radovima na energetske obnovi zgrade Srednje škole Vrbovec, Dostupno na: <https://eojn.nn.hr/Oglasnik/>
- [18] Dom za starije osobe Bjelovar: Dokumentacija o nabavi – za provedbu postupka javne nabave za nabavu usluge “Stručni nadzor nad radovima na energetske obnovi zgrade Doma za starije osobe Bjelovar na adresi Vlahe Paljetka 1, 43000 Bjelovar“, Dostupno na: <https://eojn.nn.hr/Oglasnik/>
- [19] Uff, J.: Construction law, Thomson Reuters (Professional) UK Limited trading as Sweet & Maxwell, <https://nibmehub.com/opac-service/pdf/read/Construction%20Law%20by%20John%20Uff%20-12%20ed.pdf>
- [20] Industry forms of agreement, <https://www.dlapiperrealworld.com/law/index.html?t=%20construction&s=forms-of-contract-procurement-methods&c=GB-ENG-WLS>
- [21] Baugesetzbuch, <https://www.gesetze-im-internet.de/bbaug/>

- [22] Baugesetzbuch, <https://de.wikipedia.org/wiki/Baugesetzbuch>
- [23] Bauordnung, [https://de.wikipedia.org/wiki/Bauordnungen\\_\(Deutschland\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Bauordnungen_(Deutschland))
- [24] Bauherr, <https://de.wikipedia.org/wiki/Bauherr>
- [25] Bayerische Bauordnung, <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBO/True>
- [26] Bauaufsichtsbehörde, <https://de.wikipedia.org/wiki/Bauaufsichtsbeh%C3%B6rde>
- [27] Prüferingenieur für Bautechnik, [https://de.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%BCferingenieur\\_f%C3%BCr\\_Bautechnik](https://de.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%BCferingenieur_f%C3%BCr_Bautechnik)

**IZVJEŠĆA O PROVEDENOM  
DODATNOM OBRAZOVANJU I  
USAVRŠAVANJU ZAPOSLENIKA**  
rujan 2022. - srpanj 2023.

## **Pohađanje tečaja *buildingSMART Professional Certification – Foundation***

**Sonja Kolarić**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, sonja.kolaric@grad.unizg.hr

### **Sažetak**

Tečaj *buildingSMART Professional Certification – Foundation* je tečaj koji detaljno objašnjava primjenu BIM-a u građevinskim projektima - razumjeti BIM povijest i razvoj kroz godine; znati definirati pojam i značenje BIM-a; upoznati se s osnovnim pojmovima BIM-a; upoznati se s nacionalnom implementacijom BIM-a; upoznati se s osnovnom dokumentacijom; primijeniti BIM principe u projektnoj okolini. Tečaj završava formalnim ispitom nakon kojeg se dobiva *buildingSMART International* certifikat. Certifikat formalno dokazuje znanja iz područja BIM-a koja se mogu primjenjivati u daljnjem znanstvenom, nastavnom i stručnom radu.

*Ključne riječi: buildingSMART, certifikat, BIM okruženje, usavršavanje*

## **Attending *buildingSMART Professional Certification – Foundation* course**

### **Abstract**

The *buildingSMART Professional Certification – Foundation* course is a course that explains in detail the application of BIM in construction projects - understand BIM history and development over the years; know how to define the term and meaning of BIM; get to know the basic concepts of BIM; become familiar with the national implementation of BIM; become familiar with the basic documentation; apply BIM principles in project environment. The course ends with a formal exam, after which the *buildingSMART International* certificate is obtained. The certificate formally proves knowledge in the field of BIM that can be applied in further scientific, teaching and professional work.

*Key words: buildingSMART, certificate, BIM environment, training*

## Pohađanje LC3 - Doktorske Škole na École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Švicarska

Jelena Šantek Bajto

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, jelena.santek.bajto@grad.unizg.hr

### Sažetak

Sudjelovanje na cijenjenoj doktorskoj školi LC3, čiji je domaćin École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), predstavljalo je priliku za stjecanje sveobuhvatnog razumijevanja najnovijih dostignuća u području reaktivnosti i hidratacije naprednih cementnih materijala. Globalno priznanje EPFL-a za njegove istaknute akademske programe, istraživačke pothvate i značajne doprinose području znanstvenog i tehnološkog napretka dodatno naglašava značaj ove obrazovne inicijative. Nastavni program LC3 doktorske škole pruža širok spektar multidisciplinarnih prezentacija, poticajnih rasprava i praktičnog rada usmjerenih na relevantne eksperimentalne metode. Pritom se kroz edukaciju vješto isprepliću teme od izravne važnosti za istraživanja u području vapnenih veziva, kao što je hidratacija hidrauličnih veziva, procjena pucolanske reaktivnosti alternativnih materijala i temeljito istraživanje njihova utjecaja na mehanička svojstva te trajnost takvih kompozitnih struktura. Stavljajući fokus na aktivno sudjelovanje polaznika, znanstvenicima i istraživačima pruža se mogućnost neposrednog uvida u praktično provođenje laboratorijskih ispitivanja. Takav način usavršavanja dodatno ističe značaj interakcije i primjenjivosti teorijskog znanja.

*ključne riječi: LC3, alternativna veziva, hidratacija, reaktivnost, praktični rad*

## Attending LC3 - Doctoral School in the École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland

### Abstract

Participating in the esteemed LC3 - Doctoral School hosted by École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) presented a compelling opportunity to acquire a comprehensive understanding of the latest advancements in the realm of cementitious materials' reactivity and hydration. EPFL's global recognition for its distinguished academic programs, groundbreaking research endeavours, and significant contributions to the realm of scientific and technological progress further emphasized the significance of this educational initiative. The program itself offered a rich tapestry of in-depth multidisciplinary presentations, stimulating discussions, and most relevant experimental techniques. Moreover, the curriculum artfully interwove essential subjects that bore direct relevance to my research pursuits in the field of lime binders, which serve as an integral facet of my ongoing PhD thesis. Concurrently, the educational program integrates subject matters of immediate significance to research in the realm of lime binders. This encompasses a comprehensive examination of hydraulic binder hydration, evaluation of pozzolanic reactivity inherent in alternative materials, and a thorough exploration of their influence on the mechanical properties and long-term durability of composite structures. By emphasizing active participation, scientists and researchers are provided with a unique opportunity to gain firsthand insight into the practical implementation of laboratory tests. This type of training reinforces the importance of applying theoretical knowledge in a practical and enlightening manner.

*Key words: LC3, alternative binders, hydration, reactivity, practical training*



## Usavršavanje na Sveučilištu Minho iz područja procjene oštetljivosti građevina

**Antonela Moretić**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, antonela.moretic@grad.unizg.hr

### Sažetak

Cilj ovog usavršavanja, koje je provedeno na Sveučilištu Minho u Guimarãesu, bilo je proširiti znanja o potresnom ponašanju tradicionalnih zidanih konstrukcija s naglaskom na građevine u nizu, njihovom modeliranju te u konačnici procjeni potresnog rizika. Predmetne građevine odabrane su kao fokus istraživanja zbog visokog potresnog rizika, uzrokovanim kombinacijom umjerenog hazarda, povišenom izloženosti (riječ je o građevinama stambene namjene) te oštetljivosti (zidane konstrukcije čiji je uporabni vijek istekao te koje nemaju dostatnu otpornost na horizontalna djelovanja). Na kompleksnost odziva ovih građevina dodatno utječe interakcija sa susjednim jedinicama.

*Ključne riječi: potres, rizik, oštetljivost, zidane konstrukcije, usavršavanje*

## Training at the University of Minho in the field of vulnerability assessment

### Abstract

The aim of this training, which was held at the University of Minho in Guimaraes, was to expand knowledge about the seismic behaviour of traditional masonry structures with an emphasis on aggregates, their modelling and ultimately the seismic risk assessment. The structures in question were chosen as the focus of the research due to the high seismic risk, caused by a combination of moderate hazard, increased exposure (residential buildings) and vulnerability (masonry structures with expired service life and insufficient resistance to horizontal actions). The complexity of the structural response is additionally influenced by the interaction with neighbouring units.

*Key words: earthquake, risk, vulnerability, masonry structures, training*

## Ljetna škola “7<sup>th</sup> International Course on Seismic Analysis of Structures Using Opensees”

**Marija Demšić, Maja Baniček**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet  
marija.demsic@grad.unizg.hr, maja.banicek@grad.unizg.hr

### Sažetak

Ljetna škola “7<sup>th</sup> International Course on Seismic Analysis of Structures Using Opensees” održana je 5. i 6. srpnja 2022. godine na Sveučilištu u Torinu, Italija, kao dvodnevni tečaj za stjecanje osnovnih znanja i vještina služenja računalnim programom OpenSees. Razvijen na Sveučilištu u Berkeleyju, računalni program OpenSees služi za statički i dinamički proračun konstrukcija, a ovo usavršavanje bilo je usmjereno na njegovu primjenu na seizmički proračun konstrukcija metodom postupnog guranja te dinamički proračun korištenjem vremenskih zapisa na ekvivalentnom okvirnom sustavu. Budući da je navedeni računalni program otvorenog koda, vrlo je široka dostupnost uputstva za njegovo korištenje na konkretnim primjerima kako u praksi tako i u znanstvenim istraživanjima.

*Ključne riječi: OpneSees, seizmička analiza, ekvivalentni okvir, ljetna škola*

## The Summer School “7<sup>th</sup> International Course on Seismic Analysis of Structures Using Opensees”

### Abstract

The Summer School “7<sup>th</sup> International Course on Seismic Analysis of Structures Using OpenSees” was held at the University of Turin, Italy, on 5 and 6 July 2022, as a two-day course to acquire basic knowledge and skills in the use of the computer programme OpenSees. OpenSees was developed at the University of Berkeley, and it is used for static and dynamic analyses of structures, and this course was focused on its application to seismic analysis of structures using pushover analysis and time history analysis of equivalent frame systems. Since the computer programme mentioned is open-source software, there are a variety of manuals for its use with concrete examples both in practise and in scientific research.

*Key words: OpenSees, seismic analysis, equivalent frame, summer school*

## Usavršavanje na radionici “International Project Management Training” u organizaciji FEHRLa

Ivo Haladin

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ivo.haladin@grad.unizg.hr

### Sažetak

Cilj ovog usavršavanja bio je nadograditi i savladati vještine potrebne za uspješnu prijavu, vođenje i financijsko praćenje znanstvenih projekata. Radionica „International Project Management Training“ održana je u Briselu, Belgija, od 26. do 29. rujna 2022. godine u organizaciji FEHRLa (Forum of European National Highway Research Laboratories). Radionicu su vodili iskusni koordinatori EU projekata Thierry Goger i Adewole Adesyun. Radionica je bila podijeljena u 4 osnovne cjeline Pisanje projektnog prijedloga, Komunikacijske aktivnosti i diseminacija rezultata, Vođenje i isporuka projektnog prijedloga te Financijsko vođenje projekta. U 4 dana radionice učesnici su kroz praktične primjere i studije slučaja detaljno razradili važne koncepte i načine ostvarivanja ciljeva kod vođenja međunarodnih istraživačkih projekata.

*Ključne riječi: usavršavanje, IPM, FEHRL, EU projekti, znanstveni projekti*

## “International Project Management Training” at FEHRL in Brussels, Belgium

### Abstract

The goal of this training was to upgrade and master the skills necessary for successful application, management and financial monitoring of research projects. The “International Project Management Training” workshop was held in Brussels, Belgium, from September 26 to 29, 2022, organized by FEHRLa (Forum of European National Highway Research Laboratories). The workshop was led by experienced EU project coordinators Thierry Goger and Adewole Adesyun. The workshop was divided into 4 basic units Writing the project proposal, Communication activities and dissemination of results, Management and delivery of the project proposal and Financial management of the project. During the 4 days of the workshop, the participants elaborated in detail, through practical examples and case studies, important concepts, and ways of achieving goals for successful running of international research projects.

*Key words: training, IPM, FEHRL, EU projects, research projects*

# Usavršavanje na Sveučilištu u Delftu iz područja modeliranja cementnih kompozita u više razina

**Ksenija Tešić, Katarina Didulica**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet  
ksenija.tesic@grad.unizg.hr, katarina.didulica@grad.unizg.hr

## Sažetak

Na Tehničkom Sveučilištu u Delftu u listopadu 2022. godine organizirano je godišnje usavršavanje pod nazivom RILEM Multi-Scale Modeling Course for Concrete (MMC2). Cilj ovog petodnevnog tečaja bio je poboljšati znanje sudionika u numeričkom modeliranju cementnih materijala. Tečaj je bio podijeljen u četiri cjeline, i to na makro, mezo, mikro i nano razinu. Praktične sesije o numeričkom modeliranju uključivale su rješavanje problema pomoću programa Femmase, Lattice, Hymostruc i Vesta te su bile popraćene teorijskim predavanjima. Ovaj sveobuhvatni tečaj, između ostalog, uključivao je modeliranje hidratacije, razvoja topline, prodora klorida i mikrostrukture betona.

*Ključne riječi: modeliranje u više razina, simulacija strukture, beton, usavršavanje*

## Training at the Delft University in the application of multi-scale modelling of cementitious composites

### Abstract

In October 2022, an annual training course entitled RILEM Multi-scale Modelling Course for Concrete (MMC2) was organized at Delft University of Technology. The objective of the five-day course was to improve the participants' knowledge in numerical modelling of cementitious materials. The course was divided into four sections, namely macro-, meso-, micro- and nano-level. The practical sessions on numerical modelling included problem solving using Femmase, Lattice, Hymostruc and Vesta programmes and were supported by theoretical lectures. This comprehensive course, inter alia, included modelling of hydration, heat development, chloride ingress, and microstructure of concrete.

*Key words: multi- scale modelling, structure simulation, concrete, training*

## Dodatno obrazovanje i usavršavanje: Numeričko modeliranje na TU Delft

**Ivan Hafner**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ivan.hafner@grad.unizg.hr

### Sažetak

Istraživanje koje provodim u sklopu doktorskog rada “Unaprjeđenje potresnog odgovora ziđa s jednostranim FRCM pojačanjem pomoću inovativnoga detalja prihvaćanja” podrazumijeva provođenje laboratorijskih ispitivanja te izradu numeričkih modela kojima bi se rezultati laboratorijskih ispitivanja mogli i dokazati. Djelatnici na TU Delft (Faculty of Civil Engineering, Department of Applied Mechanics) zaslužni su za osmišljavanje, dizajniranje i svakodnevno usavršavanje softwaerskog paketa DIANA FEA 10. Na temelju pregleda literature došao sam do zaključka da bi korištenjem softwera DIANA FEA 10 ostvario najbolje rezultate i podudaranje sa laboratorijskim ispitivanjima korištenjem nelinearne statičke analize koja je dio toga paketa. Kako se radi o veoma kompleksnom tipu mikro modeliranja, obećana mi je pomoć od strane djelatnika TU Delft prilikom izrade modela u vidu savjeta, pristupa programskom paketu putem službene licence te radnog prostora tijekom mojeg cijelog posjeta. Rezultati će biti uključeni u samu doktorsku disertaciju.

*Ključne riječi: dodatno obrazovanje, usavršavanje, numeričko modeliranje, seizmika, doktorska disertacija*

## Supplementary education and professional development: Numerical modeling at TU Delft

### Abstract

The research I am conducting as part of my doctoral thesis, titled “Improving the seismic response of masonry piers with single sided FRCM coating using an innovative clamping details” involves conducting laboratory tests and developing numerical models to validate the results of the laboratory experiments. The staff at TU Delft (Faculty of Civil Engineering, Department of Applied Mechanics) are responsible for the development, design, and continuous improvement of the software package DIANA FEA 10. Based on a literature review, I have concluded that using the DIANA FEA 10 software will yield the best results and alignment with the laboratory tests, using nonlinear static analysis, which is part of the software package. Since it involves a highly complex type of micro-modelling, I have been promised assistance from the TU Delft staff in model development, including advice, access to the software package through an official license, and workspace throughout my entire visit. The results will be incorporated into my doctoral dissertation.

*Key words: supplementary education, professional development, numerical modelling, seismics, doctoral dissertation*

# Radionica NI LabView Core 1 održana u tvrtki National Instruments u Newburyju, Ujedinjeno Kraljevstvo

**Krešimir Burnać**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, kresimir.burnac@grad.unizg.hr

## Sažetak

Radionica koja je održana u tvrtki National Instruments u njihovom trening centru u Newburyju kraj Londona, obuhvaćala je osnove korištenja njihovog softvera NI LabView. U sklopu navedene trodnevne radionice napravljen je uvod u sučelje softvera, zatim su izvršena jednostavnija mjerenja, izrada prvih aplikacija, rad sa različitim skupovima podataka, korištenje već napisanog koda te upoznavanje sa različitim mogućnostima dekodiranja. Cilj radionice je osposobiti sudionika za samostalno korištenje softvera NI LabView uz neki od postojećih hardvera koji služe za prikupljanje podataka (NI DAQ uređaji ili uređaji koji nisu proizvedeni od strane NI), naučiti ga kako napraviti korisničko sučelje sa različitim dijagramima i tablicama te kako koristiti programske strukture, različite tipove podataka i analizirati podatke uz pomoć algoritama za obradu signala u NI LabView-u. Praktična primjena ovakvog softvera biti će implementirana kroz prikupljanje i obradu podataka o vibracijama na tramvajskom ili željezničkom vozilu u svrhu analize stanja željezničkog ili tramvajskog kolosijeka i njihovog održavanja.

*Gljučne riječi: NI LabView, obrada signala, prikupljanje podataka, mjerenje vibracija*

## NI LabView Core 1 workshop held in the National Instruments company in Newbury, United Kingdom

### Abstract

The workshop, which was held at National Instruments training centre in Newbury near London, covered the basics of using their NI LabView software. As a part of the three-day workshop, an introduction to the software interface was made, then simple measurements were made, the creation of the first applications, work with different data sets, the use of already written code and introduction to different decoding possibilities. The aim of the workshop was to teach the participant to independently use the NI LabView software with some of the existing hardware used for data collection (NI DAQ devices or non-NI devices), to teach him how to create a user interface with different charts and graphs and how to use program structures, different types of data and analyse data with the help of signal processing algorithms in NI LabView. The practical application of such software will be implemented through data acquisition and data processing of vibrations on tramway or railway vehicles, for the purpose of analysing the tram track or railway track condition, and their maintenance.

*Key words: NI LabView, signal processing, data acquisition, vibration measurements*

## Usavršavanje NETLIPSE IPAT Assessor Training u organizaciji “UK Department for Transport (DfT)” u Londonu

**Kristijan Robert Prebanić**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, kristijan.robert.prebanic@grad.unizg.hr

### Sažetak

Cilj ovog usavršavanja odnosno edukacije „IPAT Assessor Training“ je naučiti IPAT (Infrastructure Project Assessment Tool) metodologiju za ocjenjivanje, praćenje i poboljšavanje organizacije i upravljačkog sustava velikih infrastrukturnih projekata. Edukacija je jedan od glavnih preduvjeta za stjecanje statusa NETLIPSE IPAT procjenitelja („NETLIPSE IPAT® Assessor“). U posljednjih desetak godina IPAT procjenitelji odnosno timovi praktičara i istraživača iz organizacije NETLIPSE napravili su procjenu (reviziju) više od pedeset velikih projekata prometne i transportne infrastrukture u Europi. Rezultat IPAT procjena su zaključci o kritičnim točkama organizacijskog i upravljačkog sustava projekta te smjernice kako poboljšati upravljanje i isporuku infrastrukturnih projekata odnosno kako dodatno educirati projektni tim (inženjere, stručnjake za upravljanje i nabavu i druge).

*Ključne riječi: IPAT, metodologija, organizacija, upravljanje, veliki infrastrukturni projekti*

## NETLIPSE IPAT Assessor Training, organized by the UK Department for Transport (DfT) in London

### Abstract

The goal of the “IPAT Assessor Training” training is to learn the IPAT (Infrastructure Project Assessment Tool) methodology for evaluating, monitoring and improving the organization and management system of large infrastructure projects. Education is one of the main prerequisites for acquiring the status of NETLIPSE IPAT Assessor (“NETLIPSE IPAT® Assessor”). In the last ten years, IPAT assessors, that is, teams of practitioners and researchers from the organization NETLIPSE, have made an assessment (audit) of more than fifty large transportation and infrastructure projects in Europe. The result of the IPAT assessment is in depth review of the critical points of the project’s organizational and management system and guidelines on how to improve the management and delivery of infrastructure projects, i.e. how to further educate the construction project team (engineers, management and procurement experts and others).

*Key words: IPAT, methodology, organization, management, large infrastructure project*

## Usavršavanje na Sveučilištu u Paviji pod nazivom “Performance based earthquake engineering”

**Karlo Ožić, Tvrтко Renić**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet  
karlo.ozic@grad.unizg.hr, tvrtko.renic @grad.unizg.hr

### Sažetak

Usavršavanje provedeno na Sveučilištu „Scuola Univeristaria Superiore Pavia“ je trening škola u sklopu ROSE doktorskog programa. Cilj usavršavanja je upoznavanje sa trenutnim građevinskim propisima i drugim standardnim metodama seizmičke analize, pružiti bolje razumijevanje ovih naprednih tema i najsuvremenije metode projektiranja na temelju ponašanja konstrukcije (PBEE - performance-based design). Također, jedan od fokusa trening škole je kvantificiranje neizvjesnosti, izračunavanje rizika i procjena ekonomskih gubitaka. Korištenjem programskog jezika Python, optimiziralo se vrijeme potrebno za provedbu kompleksnih dinamičnih analiza. Kroz niz različitih analiza kao npr. Incremental dynamic analysis (IDA), Cloud analysis (CA) i Multiple stripe analysis (MSA) dobiven je uvid u ponašanje zgrade, rizik i ekonomske gubitke.

*Gljučne riječi: PBEE, rizik, ekonomski gubici, dinamičke analize, usavršavanje*

## Training at the University in Pavia under the name “Performance based earthquake engineering”

### Abstract

The training held at the University “Scuola Univeristaria Superiore Pavia” is a training school within the ROSE doctoral program. The goal of the training school is to become familiar with current building regulations and other standard methods of seismic analysis, to provide a better understanding of these advanced topics and the most state-of-the-art design methods based on the behavior of the structure (PBEE - performance-based design). Also, one of the focuses of the training school is the quantification of uncertainty, risk calculation and assessment of economic losses. By using the Python programming language, the time needed to perform complex dynamic analyzes was optimized. Through a series of different analyses, such as incremental dynamic analysis (IDA), cloud analysis (CA) and multiple stripe analysis (MSA) an insight into the behavior of the building, risk and economic losses was obtained.

*Key words: PBEE, risk, economic losses, dynamic analysis, training*



## Usavršavanje na Mathematical Sciences Research Institute iz područja diofantske geometrije

**Nikola Adžaga**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, nikola.adzaga@grad.unizg.hr

### Sažetak

Cilj ovog usavršavanja bio je dopuniti znanja iz diofantske geometrije te nastaviti suradnju s dvjema kolegicama (Lea Beneish, Boya Wen) koje rade u SAD-u. Teme radionice uključivale su aritmetičku statistiku, ali i racionalne točke na krivuljama i Chabautyjeve metode kojima sam se počeo baviti u nedavnim radovima (od kojih je jedan i spomenut kao uspješan primjer primjene kvadratne Chabautyjeve metode). Izlaganja su uključivala teorijske, efektivne i algoritamske metode u području, kao i usporedbe s nekim ranije nastalim metodama (poput linearnih formi u logaritmima). Kao rezultat ovog usavršavanja, značajno sam produbio svoje poznavanje diofantske geometrije što će mi koristiti u daljnjem istraživanju.

*Ključne riječi: diofantska geometrija, racionalne točke, usavršavanje*

## Training at the Mathematical Sciences Research Institute in the field of Diophantine geometry

### Abstract

The aim of this training was to expand my knowledge of Diophantine geometry and continue collaborating with two colleagues (Lea Beneish and Boya Wen) who work in the USA. The workshop covered various topics, including arithmetic statistics, rational points on curves, and Chabauty methods. I have recently been researching and utilizing these methods in my papers (and one of them was recognized as a successful application of Quadratic Chabauty). The presentations encompassed theoretical, effective, and algorithmic approaches in the field, while also providing comparisons with earlier methods (such as linear forms in logarithms). As a result of this training, my understanding of Diophantine geometry has significantly deepened, which will greatly benefit my future research.

*Key words: diophantine geometry, rational points, training*

# Dodatno usavršavanje u provođenju dinamičkih ispitivanja baziranih na eksperimentalnim metodama modalne analize

**Jurica Pajan**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, jurica.pajan@grad.unizg.hr

## Sažetak

Dodatno usavršavanje organizirano je od strane poduzeća Structural Vibration Solutions A/S koje je jedan od poznatijih proizvođača programa za eksperimentalnu modalnu analizu (ARTeMIS Modal Software). Osnovni cilj samog usavršavanja bila je razmjena iskustva između korisnika u cilju smanjenja mjernih nesigurnosti i poboljšanja razvijenih metoda i postupaka za eksperimentalno određivanje modalnih parametara (vlastitih frekvencija, modalnih oblika te prigušenja). Kroz predavanja i radne zadatke predstavljene su teorijske osnove najnovijih metoda za analizu prikupljenih podataka te su objašnjeni principi njihove primjene za detekciju oštećenja kroz sustave monitoringa građevinskih konstrukcija baziranih na analizi vibracija.

*Gljučne riječi: usavršavanje, eksperimentalna modalna analiza, modalni parametri, monitoring građevinskih konstrukcija*

## Training for performing structural dynamic tests based on experimental methods for modal analysis

### Abstract

The training course was organized by Structural Vibration Solutions A/S, a well-known producer of software for experimental modal analysis (ARTeMIS Modal Software). The main objective of the course was to exchange experiences between users in order to reduce measurement uncertainties and to improve developed methods and procedures for experimental determination of modal parameters (natural frequencies, modal shapes and damping). Lectures and tasks were used to present the theoretical background of the latest methods for data analysis and to explain the principles of their application for damage detection in vibration-based structural health monitoring systems.

*Key words: training, experimental modal analysis, modal parameters, structural health monitoring systems*

## Usavršavanje u području praćenje stanja konstrukcija za upravljanje integritetom građevinama prometne infrastrukture

**Suzana Ereiz**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, suzana.ereiz@grad.unizg.hr

### Sažetak

Cilj ovog usavršavanja provedenog na Sveučilištu u Milanu, bio je upoznati osnovne aspekte praćenja stanja konstrukcija (eng. Structural Health Monitoring, SHM). Naglasak je posebno stavljen na metode za identifikaciju oštećenja temeljene na dinamičkim parametrima konstrukcije kao alat za potporu upravljanjem cjelovitošću građevinskih konstrukcija i prometne infrastrukture. Radionica je bila podijeljena u 4 modula: osnove SHM-a, metode temeljene na modelima za identifikaciju oštećenja, metode strojnog učenja za procjenu stanja, SHM za podršku odlučivanju.

*Ključne riječi: praćenje stanja konstrukcija, identifikacija oštećenja, metode vođene podacima, metode vođene numeričkim modelom*

## Training in the Structural Health Monitoring for integrity management of civil structures and infrastructures

### Abstract

The aim of this training, held at The Polytechnic University of Milan, is to introduce the basic aspects of Structural Health Monitoring. Special emphasis is placed on the Vibration-based methods for damage identification as a decision support tool for integrity management of civil structures and infrastructures. The course is structured into 4 modules: fundamental of SHM, model-based methods for damage identification, machine learning methods for condition assessment, SHM for decision support.

*Key words: Structural Health Monitoring, damage identification, data driven methods, model based methods*

## Dodatno obrazovanje i usavršavanje u području procjene stanja i ispitivanja postojećih zidanih konstrukcija

Luka Lulić

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, luka.lulic@grad.unizg.hr

### Sažetak

Korisna iskustva i znanja stečena su tijekom dodatnog obrazovanja i usavršavanja na Španjolskom nacionalnom znanstvenom institutu u Madridu. Boravak je trajao 29 dana, a svrha je bila prikupljanje znanja iz područja procjene stanja i ispitivanja postojećih zidanih konstrukcija te isto primijeniti prilikom izrade doktorske disertacije. Osim toga, jedan od ciljeva boravka na eminentnoj europskoj znanstvenoj instituciji je upoznavanje i povezivanje s uspješnim znanstvenicima u tom polju kako bi se omogućila potencijalna buduća suradnja na zajedničkim znanstvenim projektima i radovima.

*Ključne riječi: dodatno obrazovanje, usavršavanje, procjena postojećih građevina, zidane konstrukcije*

## Supplementary education and development in the field of assessment and testing of existing masonry structures

### Abstract

Useful experience and knowledge are acquired during supplementary education and development at the Spanish National Research Council in Madrid. The stay lasted 29 days and its purpose was to gain knowledge in the field of assessment and testing of existing masonry structures and to apply it in the preparation of a doctoral thesis. In addition, one of the objectives of the stay at an eminent European scientific institution is to meet and connect with successful scientists in the field for possible future collaboration in scientific projects and papers.

*Key words: supplementary education, development, assessment of existing structures, masonry structures*



**SAŽECI OBRANJENIH  
DOKTORSKIH RADOVA**  
rujan 2022. - srpanj 2023.

## Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju rujan 2022. – srpanj 2023.

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
<b>2022. godina</b>	
Sustav ranoga upozorenja približavanja graničnoj ekonomičnosti građevinskih strojeva pri zemljanim radovima dr. sc. Martina Šopić	143
Utjecaj promjene geometrije pritiskalica za pričvršćenje tračnica na mehaničko ponašanje sustava pričvršćenja dr. sc. Maja Baniček	144
Razvoj protočnog hibridnog ultrazvučnog i elektrokoagulacijskog postupka za pročišćavanje zauljenih otpadnih voda mineralnog porijekla dr. sc. Hana Posavčić	145
Utjecaj lutajućih struja na elemente pričvršćenja kolosijeka u urbanim sredinama dr. sc. Katarina Vranešić	146
Inverzija krivulja disperzije površinskih valova primjenom evolucijskog algoritma dr. sc. Gordana Ivoš	147
Povećanje pouzdanosti hidroloških modela na planinskim slivovima integracijom daljinskih istraživanja dr. sc. Karlo Leskovar	148
Analiza utjecaja angažiranja interesnih sudionika na uspješno izvršenje infrastrukturnih projekata dr. sc. Kristijan Robert Prebanić	149
Utjecaj kompleksnosti na uspjeh građevinskog projekta iz perspektive izvođača radova dr. sc. Marin Nikolić	150
Ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima dr. sc. Nikola Perković	151
<b>2023. godina</b>	
Poboljšanje modela konačnih elemenata mostova primjenom algoritma temeljenoga na teoriji igara dr. sc. Suzana Ereiz	152
Procjena životnoga vijeka kod umora zavarenih čeličnih konstrukcijskih detalja obrađenih metodom mehaničkoga udara visokom frekvencijom dr. sc. Boris Fuštar	153
Primjena strojnog učenja za generalizaciju ponašanja nasipa za obranu od poplava tijekom visokih voda dr. sc. Nicola Rossi	154
Razvoj betona visokih uporabnih svojstava smanjenog ekološkog otiska dr. sc. Kiran Ram Porikam Poil	155

## dr. sc. Martina Šopić

### Životopis

Martina Šopić rođena je 1987. u Rijeci. Građevinski fakultet u Rijeci upisala je 2006. na kojem je 2009. završila preddiplomski sveučilišni studij, a 2011. diplomski sveučilišni studij. Od 2012. do 2014. radila je u tvrtki RK-projekt d.o.o. kao suradnica u projektnom uredu. Stručni ispit u strukovnom području građevinarstva položila je 2014. Od 2015. do 2016. radila je u Ugostiteljskoj školi Opatija kao nastavnica pripravnica gospodarske matematike. Od 2016. zaposlila se kao asistentica na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Iste 2016. na Građevinskom fakultetu u Zagrebu upisala je poslijediplomski doktorski studij. Dana 1. rujna 2022. uspješno je obranila doktorski rad. Trenutno radi kao viša asistentica na Građevinskom fakultetu u Rijeci na Katedri za organizaciju i tehnologiju građenja.

Mentori:            prof. dr. sc. **Mladen Vukomanović**  
                          prof. dr. sc. **Diana Car-Pušić**

Datum obrane: 1. 9. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## Sustav ranoga upozorenja približavanja graničnoj ekonomičnosti građevinskih strojeva pri zemljanim radovima

### Sažetak

U disertaciji je opisan model istraživanja koji se sastoji od šest različitih, međusobno povezanih, koraka. Posebno značajni koraci modela su inovativan i praktičan protokol za prikupljanje i obradu podataka s gradilišta te pristupačan sustav ranoga upozorenja. Primjena protokola za prikupljanje i obradu podataka uključuje korištenje: video kamere (ili pametnog telefona), tehnologije GPS i programskih podrški (softvera) u svrhu procjene stvarne produktivnosti bagera i kamiona kiperera. Sustav ranoga upozorenja služi za pravovremenu i pouzdanu detekciju (granične) ekonomičnosti rada i praga rentabilnosti bagera i kamiona kiperera. U glavne znanstvene doprinose modela istraživanja ubraja se: integracija uređaja audiovizualnih tehnologija (video kamera) i osjetilnih tehnologija (GPS) s ciljem optimalne zabilježbe rada bagera i kamiona kiperera (preciznih iskaza vremenskih ciklusa rada), primjena algoritma strojnog učenja (ACF) s ciljem automatske detekcije (prepoznavanja) radne operacije utovara (procjene volumena utovarenog materijala) te razvijeni sustav ranoga upozorenja. U glavni stručni doprinos istraživanja ubraja se izrada detaljnih uputa i smjernica za primjenu modela istraživanja, posebno protokola za prikupljanje i obradu podataka. Upute i smjernice trebaju osobito koristiti izvođačima radova za provedbu sličnih istraživanja poradi vlastitog profita i interesa. Primjena modela istraživanja na gradilištu infrastrukturnog projekta, i njegova verifikacija, dokazala je istinitost postavljene hipoteze disertacije. Metode koje su se koristile za testiranje hipoteze uključuju: metodu modeliranja, statističku metodu, metodu programiranja, komparativnu metodu, metodu studija slučaja, metodu analize i sinteze te metodu dokazivanja. Model istraživanja predstavlja jedinstven i suvremen model za praćenje i kontrolu progressa zemljanih radova u svrhu pravovremenog donošenja ispravnih odluka pri korištenju strojeva.



## dr. sc. Maja Baniček

### Životopis

Maja Baniček rođena je 1986. u Varaždinu. Diplomirala je 2010. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Po završetku studija radi kao projektant konstrukcija u Varaždinu, a od svibnja 2017. radi na Građevinskom fakultetu u Zagrebu na Zavodu za tehničku mehaniku kao asistentica te kao doktorandica na projektu "Razvoj DIV elastične pritiskalice" te sudjeluje u nastavi na predmetima preddiplomskog i diplomskog studija. Dobitnica je "Kolos" nagrade Hrvatske komore inženjerstva građevinarstva za 2021. godinu. Također je dobitnica Nagrade za najbolji rad na znanstvenom skupu Zajednički temelji 2019. Trenutno je uključena u jedan projekt financiran od Hrvatske zaklade za znanost i jedan od Europskog fonda za regionalni razvoj. Do danas, kao autor i koautor objavila je, 5 poglavlja u knjigama, devet članaka u znanstvenim časopisima i više od 20 članaka na znanstvenim simpozijima.

Mentori: izv. prof. dr. sc. **Mario Uroš**  
prof. dr. sc. **Stjepan Lakušić**

Datum obrane: 21. 9. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## Utjecaj promjene geometrije pritiskalice za pričvršćenje tračnica na mehaničko ponašanje Sustava pričvršćenja

### Sažetak

U radu je nizom numeričkih modela analiziran utjecaj promjene geometrije dvaju poznatih tipova elastičnih pritiskalice za pričvršćenje tračnice na podlogu, SKL14 i Nabla, na mehaničko ponašanje sustava pričvršćenja. Geometrijska parametrizacija pritiskalice provedena je primjenom programskih skripata, razvijenih za oblikovanje prostornih numeričkih modela. Uporabom programskog paketa Abaqus, računalnog alata za numeričke proračune, izrađeni su modeli za simulaciju statičkoga ispitivanja nekoliko inačica geometrijski parametriziranih pritiskalice, čime je dobiven uvid u promjenu njihova statičkog ponašanja pri promjeni geometrijskih parametara.

U radu su priloženi postupci izrade detaljnih numeričkih modela sustava pričvršćenja W14 i NABLA. Na modelima obaju sustava provedene su numeričke analize s geometrijski parametriziranim pritiskalicama.

Znanstveni doprinos rada jest metodologija razvijena za izradu numeričkih modela s rezultatima vrlo bliskim rezultatima ispitivanja fizikalnih prototipova sklopova pri statičkom ispitivanju pritiskalice i rezultatima ispitivanja sustava pričvršćenja. Pokazano je da su numerički modeli pouzdani alati za procjenu utjecaja promjene geometrije pritiskalice na promjenu njihova statičkog ponašanja, te ocjenu ponašanja cijelog sustava pričvršćenja, bez provođenja dugotrajnih i skupih ispitivanja u laboratoriju. Također je pokazano da su razvijene vizualne skripte dobar alat za geometrijsku parametrizaciju postojećih pritiskalice ali i alat za brzu obradu numeričkih rezultata radi njihove eventualne optimizacije.

## **dr. sc. Hana Posavčić**

### **Životopis**

Rođena je 26. prosinca 1992. u Zagrebu. Diplomirala je 2016. na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, usmjerenje Hidrotehnika. Od 2017. do 2020. g. radila je kao stručna suradnica na Zavodu za hidrotehniku Građevinskoga fakulteta u Zagrebu, a od 2020. do 2021. radila je na Centru Građevinskoga fakulteta d.o.o. za projektiranje i nadzor nad gradnjom. Od travnja 2021. zaposlena je kao asistentica na Zavodu za hidrotehniku Građevinskoga fakulteta u Zagrebu gdje sudjeluje u nastavnim, znanstvenim i stručnim poslovima. U prosincu 2019. položila je stručni ispit iz područja građevinarstva za obavljanje poslova sudionika u gradnji. U okviru znanstvene djelatnosti objavila je niz znanstvenih radova u koautorstvu te sudjeluje u realizaciji dva znanstveno-istraživačka projekta.

Mentor: izv. prof. dr. sc. **Ivan Halkijević**

Datum obrane: 27. 9. 2022.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Razvoj protočnog hibridnog ultrazvučnog i elektrokoagulacijskog postupka za pročišćavanje zauljenih otpadnih voda mineralnog porijekla**

### **Sažetak**

Zauljene otpadne vode mineralnog porijekla predstavljaju opasnost za okoliš jer se ulja i teški metali sadržani u tim vodama tretiraju kao opasan otpad. Sukladno objavljenim istraživanjima, elektrokoagulacija (skr. EK) i ultrazvuk (skr. UZ) pokazali su se kao učinkoviti postupci u tretmanu zauljenih otpadnih voda, ali su uočene metodološke razlike i teškoće u usporedbi rezultata, kao i nedostatak istraživanja kombinacije navedenih postupaka, a naročito u protočnom režimu rada. U radu je ispitan utjecaj operativnih parametara, kao što su utjecaj protoka, gustoća struje, materijal elektroda i intenzitet UZ, na učinkovitost uklanjanja mineralnih ulja. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da se koncentracije mineralnih ulja mogu sniziti na manje od 30 mg/L uz kombinaciju UZ i EK (skr. sono-EK) s aluminijskim elektrodama, taloženje i filtraciju te operativne troškove u iznosu od 1.48 EUR/m<sup>3</sup>. Optimalna postavka sono-EK obuhvaća gustoću struje od 53.124 A/m<sup>2</sup>, 14.13 ciklusa, protok od 0.235 L/s i intenzitet UZ od 5.1 kW/m<sup>2</sup>. Znanstveni doprinos provedenog istraživanja se ogleda u definiranju funkcionalne ovisnosti protoka, gustoće struje i intenziteta UZ uz koje je moguće zadovoljiti uvjete ispuštanja pročišćenih zauljenih otpadnih voda u sustav javne odvodnje u protočnom režimu rada. Uz navedeno, utvrđeno je da dimenzioniranje protočnog uređaja za uvjete pročišćavanja velikih dotoka (protoka) zauljenih otpadnih voda zahtijeva vrlo teško ostvarive potrebne vrijednosti jakosti struje.

## dr. sc. Katarina Vranešić

### Životopis

Katarina Vranešić rođena je 1990. u Karlovcu. Diplomirala je 2015. na Sveučilištu u Zagrebu, Građevinski fakultet, gdje od 2016. radi kao asistent i sudjeluje u nastavnim, znanstvenim i stručnim poslovima. U nastavi sudjeluje u pripremi i održavanju vježbi iz kolegija na Preddiplomskom i Diplomskom sveučilišnom studiju. Kao autor i koautor objavila je 5 znanstvenih radova u časopisima te 16 radova u zbornicima skupova. Sudjelovala je u brojnim stručnim projektima. Kao član organizacijskog odbora sudjelovala je u organizaciji skupa Zajednički temelji 2017 te međunarodnih skupova pod nazivom International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA. Poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, upisala je 2016. godine, a doktorsku disertaciju obranila je 2022. godine.

Mentori:            prof. dr. sc. **Stjepan Lakušić**  
                          izv. prof. dr. sc. **Marijana Serdar**

Datum obrane: 30. 9. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## Utjecaj lutajućih struja na elemente pričvršćenja kolosijeka u urbanim sredinama

### Sažetak

Djelovanje lutajućih struja nije jedan od prioriternih problema među operatorima tračničke infrastrukture, a smjernice i pravilnici o načinima monitoringa lutajućih struja na kolosijeku te sprječavanju njihovog nastajanja ne postoje ili se ne primjenjuju. Kako bi se ustanovile štetne posljedice koje lutajuće struje uzrokuju na elementima kolosiječne konstrukcije provedena su terenska mjerenja te opsežna laboratorijska ispitivanja. Terenskim su mjerenjima ustanovljene vrijednosti lutajućih struja, a statističkom su analizom definirani parametri koji utječu na lutajuće struje. U prvoj fazi laboratorijskih istraživanja analiziran je utjecaj lutajućih struja na tračnice i elemente pričvršćenja kolosijeka s diskretno oslonjenim i pričvršćenim tračnicama. S obzirom da su rezultati pokazali kako lutajuće struje izazivaju oštećenja ne samo na tračnicama, već i na elementima pričvršćenja, pokrenuta je druga faza laboratorijskih istraživanja, gdje je promatrano kako se različiti sustavi pričvršćenja tračnica ponašaju kada na njih djeluju lutajuće struje. Ispitivanje je provedeno na uzorku elastično obložene tračnice te četiri različita sustava pričvršćenja karakteristična za kolosijeka s diskretno oslonjenim i pričvršćenim tračnicama.

Ovim su istraživanjem definirani parametri koji utječu na vrijednost lutajućih struja u urbanim sredinama, ustanovljeno je da će lutajuće struje uzrokovati lokalizirane degradacije na tračnicama i elementima pričvršćenja te je pokazano kako će se različiti sustavi pričvršćenja ponašati kada su izloženi djelovanju lutajućih struja.

## dr. sc. Gordana Ivoš

### Životopis

Gordana Ivoš rođena je u Kutini 1990. gdje je završila osnovnu i srednju školu. Preddiplomski studij građevinarstva Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu upisala je 2008., a diplomski studij, smjer geotehnika, 2011. godine. Diplomirala je 2013. godine s najvećom pohvalom. Nakon završetka fakulteta zapošljava se u Gradu Zagrebu te polaže državni stručni ispit. Na Zavodu za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu zapošljava se u rujnu 2015. godine kao asistentica te upisuje poslijediplomski studij. Od početka rada na Građevinskom fakultetu, aktivno sudjeluje u provođenju nastave na preddiplomskom i diplomskom studiju te sudjeluje u provođenju stručnih aktivnosti Zavoda za geotehniku. Kao autor i koautor objavila je sedam znanstvenih i stručnih radova.

Mentor: prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević**

Datum obrane: 11. 10. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## Inverzija krivulja disperzije površinskih valova primjenom evolucijskog algoritma

### Sažetak

U uslojenom mediju brzina širenja vala na površini ovisi o frekvenciji, odnosno valnoj duljini vala. Promjena brzine širenja vala na površini s valnom duljinom naziva se disperzija vala i usko je povezana s krutosnim karakteristikama uslojenog medija kroz kojeg val prolazi. Krutost tla je neophodan parametar za numeričke analize i prognoze deformacija geotehničkih konstrukcija. Kako bi se iz mjerene krivulje disperzije dobio profil brzina širenja posmičnih valova po dubini, potrebno je povesti proces inverzije. U radu je analiziran utjecaj tankog sloja veće i manje krutosti na dobivene krivulje disperzije. Razvijen je programski kod u programskom jeziku Python pomoću kojeg je proveden proces inverzije. Za sam proces inverzije korišten je evolucijski algoritam zasnovan na metodi optimizacije rojem čestica. Algoritam je testiran na sintetičkim profilima te je dodatno provjerena njegova funkcionalnost uzimajući u obzir moguću grešku mjerenja. Analiziran je utjecaj viših modova krivulje disperzije na rezultat procesa inverzije. Verifikacija predloženog algoritma provedena je na mjernom profilu dobivenom terenskim ispitivanjem, pri čemu su dobiveni rezultati uspoređeni s rezultatima seizmičkog CPT pokusa kako bi se provjerila pouzdanost određivanja profila tla. Znanstveni doprinos rada je oblikovanje i definiranje postupaka za pouzdanije određivanje krutosnih svojstava tla pri malim deformacijama na temelju rezultata mjerenja krivulje disperzije površinskih valova.

## dr. sc. Karlo Leskovar

### Životopis

Karlo Leskovar rođen je 26. kolovoza 1989. u Varaždinu. Osnovnu školu završava 2004. godine u Trnovcu te iste godine upisuje Gimnaziju u Varaždinu. Po završetku gimnazije, 2008. upisuje Geotehnički fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, gdje najprije 2011. završava preddiplomski, a zatim i 2013. završava diplomski studij (magna cum laude). Slijedeće godine zapošljava se na Geotehničkom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, najprije kao stručni suradnik, a zatim, 2017. kao asistent. U prosincu 2014. upisuje poslijediplomski doktorski studij građevinarstva na Građevinskom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu. Doktorski studij završava obranom disertacije pod naslovom "Increase of hydrological model skill for the mountainous basins by integration of remote sensing data" 20.10.2022. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu te stječe akademski stupanj doktora znanosti u znanstvenom području tehničke znanosti, polje građevinarstvo, grana hidrotehnika. Od travnja 2023. zaposlen je na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao viši asistent. Bavi se nastavnom i znanstvenom djelatnošću, te objavljuje ukupno devet znanstvenih i stručnih radova, od čega su tri rada objavljena u časopisima indeksiranima u časopisima indeksiranima u Web of Science Core Collection (WoSCC) bazi podataka.

Mentor: izv. prof. dr. sc. **Damir Bekić**

Datum obrane: 20. 10. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## **Povećanje pouzdanosti hidroloških modela na planinskim slivovima integracijom daljinskih istraživanja**

### Sažetak

Za pouzdano istraživanje hidroloških procesa na planinskim slivovima učestali je problem nedostatak gustoća mreže opažalnih postaja na tlu, a daljinska mjerenja količine oborina i visine snijega na udaljenim područjima predstavljaju dopunu opaženim podacima na tlu. U radu će se ocijeniti kvaliteta dva daljinski opažena produkta količine oborina, CHIRPS i ERA5, temeljem usporedbe s mjerenjima oborina na tlu. Za modeliranje otapanja snijega i leda često se koriste pojednostavljeni empirijski izrazi bazirani na stupanj-dan (eng. degree-day) metodi. U radu će se usporediti dva pristupa proračunu otjecanja na planinskim slivovima: (a) hidrološki model baziran na fizici procesa (engl. physically based model) koji koristi empirijsku degree-day metodu i (b) novi pristup razvijen na umjetnoj neuronskoj mreži koji, uz uobičajene podatke s tla, dodatno koristiti daljinski opaženu prekrivenost snijegom i mjerenja visine snijega na meteorološkim postajama, a koje postojeći pristupi često ne koriste.

## dr. sc. Kristijan Robert Prebanić

### Životopis

Rođen je 1992. u Zagrebu. Diplomirao je u lipnju 2016. završivši sveučilišni diplomski studij Građevinskog fakulteta usmjerenje Organizacija građenja na Sveučilištu u Zagrebu, s najvišom pohvalom sveučilišta (Summa Cum Laude). Od listopada 2016. godine radi kao asistent na Zavodu za organizaciju, tehnologiju i menadžment, Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu. Od 2016. godine do danas sudjelovalo je u nekoliko znanstvenih i stručnih projekata na zavodu te je objavio tri članka u znanstvenim časopisima, a ukupno dvaanaest znanstvenih i stručnih radova u koautorstvu. Aktivno je sudjelovao u organizaciji nekoliko OTMC međunarodnih znanstvenih konferencija te vrši funkciju mlađeg urednika u znanstvenom časopisu OTMCJ. Član je međunarodnih asocijacija iz područja upravljanja projektima (IPMA-e) i upravljanja velikim infrastrukturnim i transportnim projektima (NETLIPSE) te domaće asocijacije iz područja organizacije građenja (HOUG).

Mentor: prof. dr. sc. **Mladen Vukomanović**

Datum obrane: 21. 11. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## **Analiza utjecaja angažiranja interesnih sudionika na uspješno izvršenje infrastrukturnih projekata**

### Sažetak

Procese i aktivnosti građevinskih projekata organiziraju i provode različiti pojedinci ili grupe koji mogu imati različite razine interesa u projektu, a nazivaju se interesnim sudionicima. U infrastrukturnim projektima velik broj ugovornih strana i nerijetka pojava suprotstavljenih ciljeva uzrokuju prekoračenja projektnih ciljeva (npr. trošak, vrijeme...). Stoga je disciplina angažiranja interesnih sudionika (AIS) prepoznata kao važna strategija za postizanje uspješnog projektnog izvršenja. Pri istraživanjima koja obrađuju temu pokazatelja izvršenja i AIS vrlo je mali udio kvantitativne naravi, češće su metode intervjua i studija slučaja. Slijedom navedenoga, ciljevi su ovog istraživanja istražiti utjecaj AIS na uspješno izvršenje infrastrukturnih projekata kvantitativnim pristupom. Prikupljanje podataka bilo je provedeno na dovršenim infrastrukturnim projektima gradnje putem kalibriranih mjernih instrumenata koji su postavljeni u ankete, a podatci su se obrađivali ponajviše putem strukturalnog modeliranja jednadžbi (SEM). Dodatno su provedeni intervjui s iskusnim voditeljima infrastrukturnih projekata i ostalim stručnjacima u infrastrukturnim projektima. Dokazano je da angažiranje interesnih sudionika utječe na uspješno projektno izvršenje u vidu roka, kvalitete i opsega, odnosno da nema statistički značajan utjecaj na trošak projekta. Podatci iz intervjua, s rezultatima kvantitativnog istraživanja, poslužili su kao inputi za razradu okvira za angažiranje interesnih sudionika u infrastrukturnim projektima čime je ostvaren drugi cilj istraživanja.

## **dr. sc. Marin Nikolić**

### **Životopis**

Marin Nikolić rođen je 28. ožujka 1989. u Zenici. Osnovnu i srednju školu završio je u Žepču. 2007. godine upisao je Građevinski fakultetu Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, na kojemu je diplomirao 2012. godine. 2013. godine upisao je poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Radni staž započeo je 2013. godine u poduzeću Hering d.d. Radno mjesto inženjera na gradilištu obavljao je kod izgradnje autoceste Zvirovići-Kravice. Potom radi kao voditelj radova na projektima izgradnje autoceste Kičevo-Ohrid u Sjevernoj Makedoniji te dionica autoceste Drivuša-Klopče i Vranduk-Ponirak u BiH. Od 2022. radi kao nadzorni inženjer i projektant u poduzeću Trasa d.o.o. Aktivan je korisnik engleskog i makedonskog jezika, a početni korisnik njemačkog jezika.

Mentor:            prof. dr. sc. **Anita Cerić**

Datum obrane: 22. 11. 2022.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Utjecaj kompleksnosti na uspjeh građevinskog projekta iz perspektive izvođača radova**

### **Sažetak**

Imajući na umu to da investitori na građevinskim projektima odgovornost za njihovo provođenje sve više prebacuju na izvođača radova, jasno je da glavnu utjecaja kompleksnosti projekta na njegov uspjeh snosi izvođač radova. Radom je definiran okvir za vrednovanje utjecaja elemenata kompleksnosti na pokretanje rizika na projektu a time i na uspjeh građevinskog projekta iz perspektive izvođača radova. U svrhu pripreme ovog okvira u programskom paketu SuperDecisions definiran je ANP okvir za analizu rezultata anketnog upitnika provedenog među voditeljima izvođenja građevinskih projekata.

Pregledom literature analizirana su dosadašnja istraživanja kompleksnosti projekta općenito, građevinskog projekta te građevinskog projekta iz perspektive izvođača radova. Istraživanjem među voditeljima građevinskih projekata izvršena je klasifikacija ključnih elemenata kompleksnosti. Na osnovu analize utjecaja elemenata kompleksnosti na uspjeh projekata kroz definirani ANP okvir u programu SuperDecisions utvrđen je okvir za vrednovanje elemenata kompleksnosti s obzirom na njihov utjecaj na pokretanje rizika i uspjeh građevinskog projekta. Nakon toga izvršena je validacija utvrđenih okvira za vrednovanje utjecaja ključnih elemenata kompleksnosti na pokretanje rizika i uspjeh građevinskog projekta. Provedenim istraživanjem dokazano je da je moguće prepoznati i definirati ključne elemente kompleksnosti projekta, vođenog od strane izvođača radova, kojima će se omogućiti rano prepoznavanje rizika i realnije postavljanje ciljeva uspjeha projekta.

## dr. sc. Nikola Perković

### Životopis

Nikola Perković rođen je 1991. u Livnu u Bosni i Hercegovini gdje je pohađao osnovnu školu, a zatim i gimnaziju koju je završio 2010. godine. Iste godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij, a zatim diplomski sveučilišni studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, koji završava u lipnju 2015. godine stekavši diplomu s najvećom pohvalom na smjeru Konstrukcije. Iste godine zaposlen je u KFK d.o.o., kao projektant metalnih i staklenih konstrukcija, gdje se zadržava dvije godine. Od veljače 2017. godine zaposlen je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao asistent na Zavodu za konstrukcije. Također, aktivno sudjeluje u izradi stručnih projekata. U prosincu 2017. godine upisuje poslijediplomski sveučilišni doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje započinje svoj istraživački rad na smjeru Inženjerske konstrukcije. Paralelno s doktorskim studijem, upisuje i poslijediplomski specijalistički studij – Požarno inženjerstvo. Kao aktivni član i suradnik sudjelovao je na HRZZ, IRI i HORIZON projektima, te u radu četiri COST akcije. Kao autor i koautor objavio je 29 znanstvenih radova, od čega 12 članaka u znanstvenim časopisima. Sudjelovao je i kao komentor u više od pet ocijenskih radova.

Mentor: prof. dr. sc. **Vlatka Rajčić**

Datum obrane: 14. 12. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## Ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima

### Sažetak

Disertacija prikazuje ponašanje inovativnih prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata koji su namijenjeni za montažni sustav gradnje. Uspoređujući ovaj inovativni sustav s postojećim montažnim sustavima, prikazane su glavne značajke i ponašanje konstitutivnih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima. Zapaljivost drveta jedan je od glavnih razloga zašto regulativa strogo ograničava drvo kao građevinski materijal, posebno za gradnju višekratnih objekata. Zbog geometrije prošupljenih drvenih elemenata i tankih vertikalnih drveni stijenki između prošupljenja, djelovanje požara može dovesti do nepravilnih rezidualnih poprečnih presjeka sa većim dubinama pougljenja u usporedbi sa standardnim drvenim elemenata. Mehaničko i požarno opterećenje zajedno sa geometrijskim i materijalnim karakteristikama drvenih konstrukcija, imaju presudnu ulogu u istraživanju njihove otpornosti. U doktorskom radu provedena je eksperimentalna i numerička analiza utjecaja mehaničkog i požarnog opterećenja na prošupljene GLT elemente, te usporedna analiza ponašanja ovog tipa elemenata sa ponašanjem za praksu uobičajenih GLT elementa. Eksperimentalno istraživanje provedeno je u dvije glavne faze. Prva faza odnosila se na istraživanje ponašanja prošupljenih uzoraka u ambijentnim uvjetima, dok se druga faza odnosila na istraživanje u požarnim uvjetima (izloženost linijskih elemenata s jedne i tri strane, nosivi zid, te spojevi). Razvijen je novi pristup numeričkog modeliranja metodom konačnih elemenata (MKE), korišten za evaluaciju debljine pougljenog sloja, te su predloženi proračunski modeli za određivanje mehaničke i požarne otpornosti prošupljenih drvenih elemenata.



## **dr. sc. Suzana Ereiz**

### **Životopis**

Suzana je rođena 1996. u Splitu. Preddiplomski studij građevinarstva upisuje 2014. godine, nakon čega nastavlja i diplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu gdje je diplomirala u rujnu 2019. Višestruko je nagrađivana od strane Fakulteta i Sveučilišta za akademska i znanstvena postignuća, a 2019. godine dobila je Rektorovu nagradu za individualni znanstveno-istraživački rad. Poslijediplomski doktorski studij upisuje u rujnu 2019. godine na istom fakultetu. Od veljače 2020. radi na Zavodu za tehničku mehaniku kao asistent na projektu. Kao autor i koautor objavila 6 znanstvenih članaka u znanstvenim časopisima i 6 konferencijskih radova.

Mentori: izv. prof. dr. sc. **Ivan Duvnjak**  
izv. prof. dr. sc. **Javier Fernando Jiménez Alonso**

Datum obrane: 3. 3. 2023.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Poboljšanje modela konačnih elemenata mostova primjenom algoritma temeljenoga na teoriji igara**

### **Sažetak**

U istraživanju je razvijena primjena teorije igara kao računalnog alata za rješavanje problema poboljšanja numeričkih modela mostova temeljena na metodi najveće vjerojatnosti. Poboljšanje se obično izvodi pomoću determinističke metode najveće vjerojatnosti definiranjem poboljšanja kao problema optimizacije kroz funkciju jednog ili više ciljeva. Tako se dobiva numerički model koji odražava stvarno ponašanje konstrukcije. Ograničenja metode najveće vjerojatnosti povezana su s izvedbom procesa poboljšanja. Kako bi se ona prevladala, u istraživanju je uzeta u obzir teorija igara. Konvencionalni problem poboljšanja preformuliran je u problem teorije igara, uzimajući u obzir tri različita modela igre: nekooperativni, kooperativni i evolucijski. Procjena učinkovitosti provedena je na dvije studije slučaja, jednostavnom laboratorijskom modelu mosta i modelu konačnih elemenata visoke točnosti visećeg pješačkog mosta. Teorija igara pokazala se učinkovitim alatom za poboljšanje performansi procesa poboljšanja modela konačnih elemenata prema metodi najveće vjerojatnosti - osigurava smanjenje vremena računanja bez ugrožavanja točnosti rješenja.

## **dr. sc. Boris Fuštar**

### **Životopis**

Boris Fuštar rođen je 1990. u Slavonskom Brodu, gdje završava osnovnu školu i matematičku gimnaziju. Nakon srednjoškolskog obrazovanja upisuje sveučilišni preddiplomski studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku kojeg završava 2012. godine. Na istom fakultetu 2014. stječe diplomu na smjeru Nosive konstrukcije, a 2015. stječe diplomu na smjeru na smjeru Hidrotehnika. Godine 2014. upisuje sveučilišni poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na smjeru Inženjerske konstrukcije. Od 2015. godine do danas se bavi poslovima projektiranja u području niskogradnje te inženjerskih konstrukcija poput mostova, propusta, potpornih zidova itd.

Mentor: doc. dr. sc. **Ivan Lukačević**

Datum obrane: 12. 4. 2023.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Procjena životnoga vijeka kod umora zavarenih čeličnih konstrukcijskih detalja obrađenih metodom mehaničkoga udara visokom frekvencijom**

### **Sažetak**

Umor je progresivna i lokalizirana pojava postupnog oštećivanja materijala uslijed dugotrajnih ciklički promjenjivih naprezanja. U slučaju zavarenih čeličnih konstrukcija, oštećenja umorom nastaju unutar zavarenih detalja, koji predstavljaju geometrijske i materijalne diskontinuitete. Nagle promjene geometrije uzrokuju visoke koncentracije naprezanja, čime se skraćuje životni vijek zavarenih detalja izloženih djelovanju umora. Proces zavarivanja uzrokuje vlačna zaostala naprezanja u području zavara, koja mogu dodatno skratiti njihov životni vijek. Unatoč brojnim smjernicama i preporukama za projektiranje, zadovoljavajući životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru nije uvijek moguće postići. Zbog toga su razvijene metode obrade zavara poput metode mehaničkoga udara visokom frekvencijom koja omogućuje produljenje njihovog životnog vijeka. To se postiže promjenom lokalne geometrije zavara, unošenjem tlačnih zaostalih naprezanja i povećanjem tvrdoće na mjestu obrade. U okviru ovoga istraživanja su razvijeni i kalibrirani deterministički i stohastički proračunski modeli koji omogućuju pouzdanu procjenu životnoga vijeka neobrađenih i obrađenih zavarenih detalja izloženih umoru. Laboratorijskim ispitivanjima i numeričkim analizama su određeni i analizirani parametri poboljšanja životnoga vijeka zavarenih detalja, a kalibracija modela je provedena na temelju vlastitih laboratorijskih cikličkih ispitivanja.

## dr. sc. Nicola Rossi

### Životopis

Nicola Rossi rođen je 20. lipnja 1994. u Zagrebu, u Republici Hrvatskoj. Osnovnu i srednju školu završio je u Zagrebu. Po završetku srednje škole, 2012. g. upisuje i Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je 2017. g. završivši Sveučilišni diplomski studij te stekao naziv magistar inženjer građevinarstva. Od srpnja 2017. do danas radi kao asistent na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje sudjeluje u nastavnim, znanstvenim i stručnim poslovima. U nastavi sudjeluje u pripremi i održavanju vježbi iz kolegija na Preddiplomskom sveučilišnom studiju i na Diplomskom sveučilišnom studiju. Sudjelovao je u izradi niza stručnih poslova, od idejnih do glavnih i izvedbenih projekata, na području geotehničkog inženjerstva, s fokusom na projektiranju nasipa za obranu od poplava i drugih vrsta nasipa, plitkog i dubokog temeljenja, potpornih građevina, te sanacija klizišta. Objavio je i osam znanstvenih radova u koautorstvu u znanstvenim časopisima, te međunarodnim i domaćim skupovima.

Poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu upisao je 2017. godine.

Mentor: prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević**

Datum obrane: 19. 5. 2023.

### Naslov doktorskog rada

## Primjena strojnog učenja za generalizaciju ponašanja nasipa za obranu od poplava tijekom visokih voda

### Sažetak

Nasipi su zemljane građevine koje su dio većih sustava obrane od poplava i čije otkazivanje može uzrokovati katastrofalne posljedice. Zbog varijabilnosti geotehničkih materijala, česta je primjena probablističkih metoda u analizama, što podrazumijeva sposobnost definiranja distribucija vjerojatnosti parametara materijala od interesa i izračuna sloma u smislu vjerojatnosti. Rad istražuje metodologije primjenjive za procjenu stabilnosti riječnih nasipa s obzirom na različite mehanizme sloma koji se mogu pojaviti tijekom visokih voda, sa svrhom stvaranja krivulja osjetljivosti, razumijevanja i generaliziranja ponašanja nasipa tijekom na takvih događaja. Korišteni alati su složene numeričke analize, zajedno sa statističkim, probablističkim i metodama strojnog učenja. Cilj je poboljšati upravljanje nasipima, u smislu predviđanja sloma i ranog upozorenja na potencijalni slom. To se postiže generalizacijom nasipa sastavljenih od različitih poprečnih presjeka unutar područja od interesa i predviđanjem njihovog ponašanja na temelju najvažnijih ulaznih parametara. Utvrđeno je da od preko 100 parametara potrebnih za jedinstveno definiranje bilo kojeg složenog poprečnog presjeka nasipa što je moguće realističnije pomoću numeričkih modela, samo oko jedne trećine je onih koji upravljaju njihovim ponašanjem s obzirom na nekoliko mehanizama sloma. Modeli su usredotočeni na neojačane nasipe. Međutim, nasipi ojačani geomrežama također su zasebno razmatrani te su ocjenjeni utjecaji različitih faktora tla i elemenata ojačanja na stabilnost.

## **dr. sc. Kiran Ram Porikam Poil**

### **Životopis**

Kiran Ram Porikam Poil rođen je 19. travnja 1991. u Kozhikodeu u Indiji. Završio je preddiplomski studij građevinarstva 2014. godine na State Engineering Collegeu, Thrissur, Indija. U srpnju 2017. magistrirao je građevinsku tehnologiju i menadžment na National Institute of Technology Karnataka, Indija. Tijekom magistarskog programa bavio se istraživanjem utjecaja različitih vrsta cementa na koroziju armiranog betona. Godine 2017. pridružio se Indijskom institutu za tehnologiju Madras, Indija, kao znanstveni asistent. Od 27. rujna 2019. godine zaposlen je kao doktorand na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u Hrvatskoj na projektu Švicarsko-Hrvatskog programa suradnja Advanced Low Cementitious Materials – ACT.

Mentori: izv. prof. dr. sc. **Marijana Serdar**  
prof. dr.sc. **Karen Scrivener**

Datum obrane: 24. 5. 2023.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Razvoj betona visokih uporabnih svojstava smanjenog ekološkog otiska**

### **Sažetak**

Disertacija pokazuje da se gline s malim udjelom kaolina mogu primjenjivati u cementnim kompozitima kako bi se smanjio negativni utjecaj na okoliš i postigla slična ili bolja mehanička i trajnosna svojstva betona. Razumijevanjem utjecaja različitih parametara, kao što su sadržaj kaolina, struktura pora i sposobnost vezivanja klorida, primjena glina u cementnima na bazi gline i vapnenca može biti optimizirana za različite uvjete izloženosti. Smanjenjem udjela cementa i korištenjem alternativnih mineralnih dodataka, kao što su leteći pepeo i kalcinirana glina, moguće je značajno smanjiti ugljični otisak betonske mješavine, bez ugrožavanja trajnosnih svojstava i uporabnog vijeka betonskih konstrukcija. Ovi rezultati istraživanja pridonose razvoju održivih i ekološki prihvatljivih građevinskih praksi.

ISSN 2991-3705



9 772991 370004 >