

## 8. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 5. - 6. rujna 2022., Zagreb : zbornik radova

---

**Moretić, Antonela; Stepinac, Mislav; Ožić, Karlo; Ninčević, Anthony; Miličević, Hanna; Carević, Dalibor; Bujak, Damjan; Valčić, Anđelo; Skejić, Davor; Rajić, Andrea; ...**

**Edited book / Urednička knjiga**

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

*Publication year / Godina izdavanja:* **2022**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:009099>

<https://doi.org/https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2022>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-16**

*Repository / Repozitorij:*

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



# 8. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

5.- 6. rujna 2022., Zagreb

## Zbornik radova

Urednica:  
NINA ŠTIRMER





**Izdavač**

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zagreb, Kačićeva 26

**Urednica**

prof. dr. sc. Nina Štirmer

**Dizajn naslovnice**

minimum d.o.o.

**Prijelom**

Tanja Vrančić

**Tisak**

Tiskara Zelina d.d., 2022.

**Naklada**

150 kom.

**ISBN**

ISBN: 978-953-8168-60-4

**DOI**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2022>

Zagreb, rujan 2022.

**CIP zapis**

je dostupan u računalnome katalogu  
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu  
pod brojem 001145640.

*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.*

# **8. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA**

**5. – 6. rujna 2022., Zagreb**

## **Zbornik radova**

Urednica  
**Nina Štirmer**

## Organizacijski odbor simpozija

prof. dr. sc.	<b>Nina Štirmer</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
prof. dr. sc.	<b>Ivana Banjad Pečur</b>	Zavod za materijale
prof. dr. sc.	<b>Mladen Vukomanović</b>	Zavod za organizaciju, tehnologiju i menadžment
doc. dr. sc.	<b>Ivo Haladin</b>	Zavod za prometnice
izv. prof. dr. sc.	<b>Ana Skender</b>	Zavod za tehničku mehaniku
izv. prof. dr. sc.	<b>Silvio Bašić</b>	Samostalna Katedra za zgradarstvo

## Predgovor

Program doktorskoga studija Građevinarstvo na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu zasniva se na provedbi mnogobrojnih znanstvenih istraživanja u sklopu znanstvenih-istraživačkih projekata financiranih u okviru programa Obzor 2020, Hrvatske zaklade za znanost, programa koji se financiraju putem strukturnih i investicijskih fondova za koje su nadležni Europski fond za regionalni razvoj, Ministarstvo znanosti i obrazovanja i Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta Republike Hrvatske te ostalih fondova. U mnogim projektima ostvarena je suradnja s eminentnim međunarodnim znanstvenim institucijama te industrijskim partnerima. Time se omogućuje zapošljavanje doktoranada te njihova istraživanja, usavršavanja, sudjelovanja na konferencijama, objava radova te stjecanje iskustva tijekom studijskih boravaka na drugim institucijama. Doktorski studij provodi se iz sljedećih istraživačkih grana: geotehnika, hidrotehnika, inženjerske konstrukcije, materijali u građevinarstvu, mehanika konstrukcija, organizacija građenja i prometnice. Doktorandi kroz svoja istraživanja razvijaju inovativne metode, tehnologije i proizvode u području građevinarstva. Tako će i na ovom, osmom po redu Simpoziju doktorskog studija, biti prikazana početna istraživanja doktoranada prve godine na osnovi kojih će kasnije prijavljivati teme doktorskih radova uz definiranje hipoteza, ciljeva i izvornih znanstvenih doprinosa. U tome će im svojim savjetima prvenstveno pomoći njihovi mentori, ali i drugi nastavnici na doktorskome studiju koji će svojim iskustvom i savjetima doprinijeti kvaliteti doktorskih istraživanja. Na ovogodišnjem simpoziju izlaganja će održati 22 doktoranda s vrlo aktualnim temama kao što su ponašanje građevina u slučaju potresa, primjena sofisticiranih metoda za praćenje promjene obalne linije, praćenje utjecaja vibracija od tramvajskog prometa na građevine te praćenje stanja konstrukcija općenito, proučavanje razvoja mikrostukture i analize svojstava građevinskih materijala izrađenih s nusproizvodima drugih industrija, inovacije u projektiranju pri primjeni novih materijala i građevnih proizvoda, analiza relevantnih parametara geosintetika na nosivost tla te analiza utjecaja autonomnih vozila na odabir projektnih elemenata autocesta. Kvaliteti radova znatno su doprinijeli i recenzenti koji su svojim stručnim savjetima i komentarima potaknuli autore na poboljšanja i dali im nove ideje koje će koristiti u budućim istraživanjima. Vjerujemo da će pri izlaganju svojih radova doktorandi dobiti i mnoge korisne savjete od nastavnika na doktorskome studiju i kolega koji će prisustvovati simpoziju. Cilj je simpozija i stjecanje iskustva u predstavljanju rezultata vlastitih istraživanja koje će doktorandi kasnije prezentirati i na drugim domaćim i međunarodnim konferencijama. Na dosadašnjih sedam simpozija održano je približno 120 izlaganja doktoranada, a uz to se na simpoziju redovito predstavljaju i iskustva zaposlenika fakulteta s dodatnog obrazovanja i usavršavanja na inozemnim institucijama. Time sudionici sim-

pozija dobivaju uvid u mogućnosti stjecanja dodatnih kompetencija i vještina koje mogu primijeniti u svojim istraživanjima. Na simpoziju će biti održano i pozvano predavanje s vrlo zanimljivom temom "urbanog rudarenja", odnosno procjene sastava materijala postojećih zgrada pomoću BIM i GIS tehnologije. Dodatno će biti održana dva pozvana predavanja o iskustvima pri izradi doktorskoga rada te primjeni stečenih znanja za rad u industriji.

Organizacijski odbor simpozija koji čine članovi Odbora za znanost Građevinskoga fakulteta prvenstveno zahvaljuje autorima radova, a potom i recenzentima koji su omogućili održavanje 8. Simpozija doktorskog studija Građevinarstva. Svim sudionicima simpozija, a osobito doktorandima i njihovim mentorima želimo da iskustvo stečeno izradom i predstavljanjem radova doprinese novim saznanjima, idejama i suradnjama te uspješnom definiranju nacрта teme doktorskoga rada.

Zagreb, 8. kolovoza 2022.

Urednica



prof. dr. sc. **Nina Štirmer**

# Sadržaj

Predgovor .....	5
Procjena oštećljivosti građevina u nizu - makroseizmički i analitički pristup Antonela Moretić, Mislav Stepinac.....	9
Procjena seizmičke otpornosti zidanih zgrada uporabom vizualnog programiranja prema normativno propisanim kriterijima pravilnosti konstrukcije Karlo Ožić, Mislav Stepinac, Anthony Ninčević.....	21
Učinkovitost detekcije obalne linije pomoću video sustava - primjer plaže Ploče u Rijeci Hanna Miličević, Dalibor Carević, Damjan Bujak.....	33
A research review on aluminium beam-to-column joints Andelo Valčić, Davor Skejić.....	43
Analiza otpornosti na savijanje LWT-FLOOR sustava Andrea Rajić, Ivan Lukačević.....	57
Mogućnosti primjene bespilotnih letjelica za pregled i praćenje stanja mostova Jurica Pajan, Ivan Duvnjak.....	71
Utjecaj zamjene cementa metakaolinom i vapnenačkim filerom na svojstva UHPC-a Antonija Ocelić, Ana Baričević.....	83
Numeričko modeliranje posmične veze između čelika i betona kod spregnutih nosača izvedenih od hladno oblikovanih profila Vlaho Žuvelek, Ivan Čurković.....	97
Odabir optimalne mjere intenziteta tipične zidane zgrade u urbanom području grada Zagreba Ante Pilipović, Mario Uroš.....	111
Analiza utjecaja primjene geomreža na mehanizam loma u tlu kod plitkog temeljenja Anesa Merdan, Mario Bačić.....	125
On the relation of microstructure development and time- zero as the beginning of autogenous shrinkage Katarina Didulica, Ana Baričević.....	137
Pregled stanja područja zgrada u blokovima i metoda konstrukcijskog ojačanja s osvrtom na karakteristike grada Zagreba Jakov Oreb, Josip Atalić.....	149
Trajnost umjetnih vlakana u cementnim kompozitima Branka Mrduljaš, Ana Baričević.....	163



Obrada i interpretacija rezultata složenih dinamičkih numeričkih proračuna Romano Jevtić Rundek, Mario Uroš .....	175
Pregled metoda za određivanje utjecaja vibracija od prometovanja tramvajskih vozila na okolne građevine Krešimir Burnać, Ivo Haladin .....	187
Mogućnosti primjene pepela drvene biomase kao djelomične zamjene sitnog agregata u lijevanom betonu Sonja Cerković, Nina Štirmer .....	201
Freeze-thaw resistance with de-icing salts of alkali-activated slag concrete: the influence of activator type and dosage and comparison to the ordinary Portland cement concrete Olivera Bukvić, Marijana Serdar .....	213
Utjecaj optimizacije gustoće pakiranja čestica na smanjenje količine portlandcimenta u betonu Petra Štefanec, Ivan Gabrijel .....	225
Utjecaj autonomnih vozila na odabir projektnih elemenata autocesta Ana Čudina Ivančev, Vesna Dragčević.....	235
Utjecaj klorida iz zraka na trajnost betona u morskom okolišu Dora Kolman, Ivan Gabrijel.....	247
Analiza ponašanja tradicijskih zidanih zgrada u bloku/nizu prilikom izvedbe zamjenske zgrade po važećim propisima Maja Mrkonjić, Josip Atalić.....	255
Parametarsko modeliranje i varijacije oblika Boris Uremović, Ivica Završki .....	271
Usavršavanja .....	283
Pozvana predavanja .....	291
Sažeci obranjenih doktorskih radova: rujan 2021. - srpanj 2022 .....	295

# Procjena oštetljivosti građevina u nizu - makroseizmički i analitički pristup

**Antonela Moretić<sup>1</sup>**, doc. dr. sc. **Mislav Stepinac<sup>2</sup>**

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

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

## Sažetak

Jezgre mnogih europskih gradova, koje su ujedno i gradska kulturna središta, čine blokovi zgrada sastavljeni uglavnom od zidanih konstrukcija. Ograničen prostor za širenje i rast broja stanovnika rezultirali su formiranjem blokova zgrada. Iznimka nije ni Hrvatska, primjerice blokovi su karakterističan tip gradnje u Donjem gradu u Zagrebu. S obzirom da se ponašanje građevina u bloku u slučaju potresa razlikuje od ponašanja samostojećih konstrukcija, za građevinske inženjere one predstavljaju poseban izazov. Rad prikazuje dva pristupa procjene oštetljivosti konstrukcija, s naglaskom na utjecaj bloka, tj. na međudjelovanje konstrukcija.

*Ključne riječi: zidane konstrukcije, blokovi, oštetljivost, makroseizmički pristup, analitički pristup, postojeće konstrukcije*

## Vulnerability assessment of building aggregates – macroseismic and analytical approach

### Abstract

Historical centers of many European cities, which are also the cultural centers, are composed of building aggregates formed mainly of masonry structural units. Limited space for expansion and population growth caused development of a new structural form – building aggregates. Croatia is no exception; for example, building aggregates are typical for historical Lower Town in Zagreb. Since the behavior of building aggregates in the case of an earthquake differs from the behavior of isolated structures, they represent a special challenge for civil engineers. The paper presents two approaches to the vulnerability assessment, with emphasis on the impact of aggregates, i.e., on the interaction of structures.

*Key words: masonry structures, building aggregates, vulnerability, macroseismic approach, analytical approach, existing structures*

## 1 Uvod

Potresni rizik moguće je kvalitativno i kvantitativno izraziti ovisno o tri čimbenika – seizmičkom hazardu, izloženosti te oštećljivosti građevinskog fonda. Oštećljivost se definira kao podložnost građevina učincima potresa, a njenom procjenom definira se vjerojatnost nastupanja određene razine oštećenja kod građevine prilikom djelovanja potresa [1]. Metode za procjenu oštećljivosti mogu se klasificirati kao empirijske, analitičke ili pristup baziran na inženjerskoj procjeni [2]. Empirijske metode se temelje na statističkim podacima raspoloživim zahvaljujući pregledima nakon potresa, dok se analitički pristup temelji na numeričkim modelima za simulaciju seizmičkog odziva konstrukcija te je neovisan o dostupnosti podataka o oštećenjima. Iz tih razloga u Hrvatskoj je dosad bio prikladniji analitički pristup, ali sada postoji detaljna baza podataka o oštećenjima (za područja pogođena potresom) što otvara vrata primjeni empirijskih metoda. U radu su opisane makroseizmička (empirijski pristup) te analitička metoda procjene oštećljivosti, s osvrtom na građevine u nizu. U praksi se često zanemaruje složeno međudjelovanje građevina u nizu prilikom proračuna, tj. tretiraju se kao samostojeće građevine jer suvremene norme ne pružaju detaljne smjernice glede proračuna građevina u nizu. Za razliku od samostojećih građevina, građevine u nizu izložene su značajnijim torzijskim učincima. Potresna otpornost građevine u nizu ovisi o nizu čimbenika; položaju u nizu, rasporedu nosivih elemenata, položaju međukatnih konstrukcija, smjeru djelovanja potresnih valova, itd. Građevine koje formiraju blok često ne datiraju iz istog perioda, imaju različite konstrukcijske sustave te materijalne karakteristike što doprinosi kompleksnosti ponašanja prilikom djelovanja potresa. Utjecaj bloka može biti pozitivan, ali i negativan stoga se ne smije zanemariti. Definiranje potresnog rizika je nužno kako bi se moglo utjecati na njegovu redukciju. Nedavni potresi, iako umjerenih magnituda uzrokovali su veliku štetu [3, 4] te ukazali na potrebu definiranja potresnog rizika u Hrvatskoj s ciljem izbjegavanja ponavljanja zagrebačkog i petrinjskog scenarija.

## 2 Makroseizmički pristup

Metoda indeksa oštećljivosti makroseizmička je metoda čije su prednosti brzina i jednostavnost njene primjene. Za relativno kratko vrijeme moguće je dobiti okvirnu i dovoljno točnu procjenu oštećljivosti za velik broj građevina [5, 6]. Građevine je potrebno pregledati, nabaviti projektnu dokumentaciju te rezultate pregleda nakon potresa ako je predmetno područje bilo pogođeno potresom (slika 1) itd. Čak i uz ograničenu bazu podataka i brojne pretpostavke, ovaj pristup koristan je alat za procjenu oštećljivosti.



Slika 1. Podaci potrebni za procjenu oštećljivosti: a) Rezultati pregleda građevina nakon potresa [7], b) Projektna dokumentacija [8]

Za procjenu zidanih konstrukcija najčešće se koristi obrazac koji su predložili autori Benedetti i Petrini, a sastoji se od 10 parametara te se odnosi na samostojeće građevine [9]. Naknadno je obrazac proširen s dodatnih pet parametara kojima se uzima u obzir utjecaj bloka (tablica 1) [10].

Tablica 1. Obrazac za procjenu oštećljivosti građevina [11]

Parametar	Razred				Težinski faktor
	A	B	C	D	
1. Povezanost međusobno okomitih zidova	0	5	20	45	1,00
2. Tip zidanih elemenata	0	5	25	45	0,25
3. Tlo i temeljenje	0	5	25	45	0,75
4. Raspodjela nosivih elemenata	0	5	25	45	1,50
5. Pravilnost tlocrta	0	5	25	45	0,50
6. Raspodjela mase po visini	0	5	25	45	0,50
7. Tip međukatne konstrukcije	0	5	15	45	0,80
8. Krovnište	0	15	25	45	0,75
9. Detalji	0	0	25	45	0,25
10. Stanje građevine	0	5	25	45	1,00
11. Prisutnost susjednih jedinica različite visine	-20	0	15	45	1,00
12. Pozicija jedinice u nizu građevina	-45	-25	-15	0	1,50
13. Broj razmještenih katova	0	15	25	45	0,50
14. Konstruktivna ili tipološka heterogenost između susjednih jedinica	-15	-10	0	45	1,20
15. Postotak razlike ploština otvora između susjednih fasada	-20	0	25	45	1,00

Indeks oštjetljivosti  $I_V$  (Vulnerability index) računa se prema izrazu (1):

$$I_V = \sum_{i=1}^{i=n} S_i \cdot W_i \quad (1)$$

gdje  $S_i$  predstavlja vrijednost parametra za procijenjeni razred konstrukcije, a  $W_i$  vrijednost težinskog faktora [12]. Definirana su četiri moguća razreda konstrukcija, gdje A predstavlja najpovoljniji, a D najkritičniji razred. Za većinu parametara razred konstrukcije određuje se vizualnim pregledom građevine s obzirom da su kriteriji klasifikacije izraženi kvalitativno, dok je za nekolicinu parametara kriterij definiran kvantitativno stoga je razred potrebno izračunati. Težinski faktor  $W_i$  razlikuje se za svaki parametar ovisno o njegovoj utjecajnosti. Indeks oštjetljivosti zatim se svodi na normaliziranu vrijednost [10] prema izrazu (2):

$$V_i = \left[ \frac{I_V - \left( \sum_{i=1}^{i=n} S_{\min} \cdot W_i \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} (S_{\max} \cdot W_i) - (S_{\min} \cdot W_i)} \right] \quad (2)$$

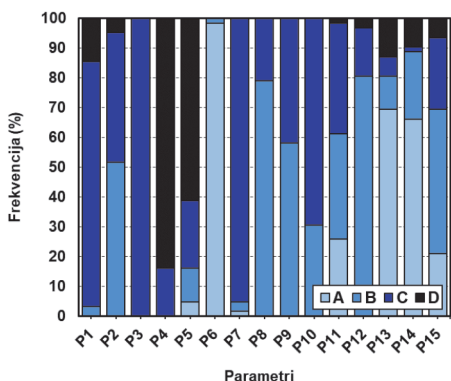
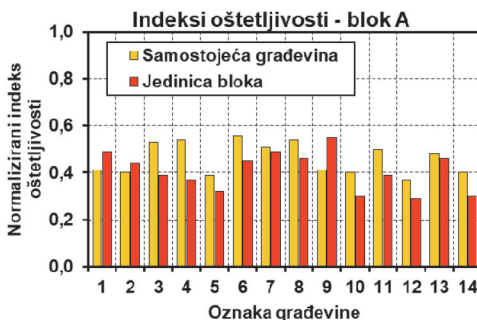
U izrazima (1) i (2), vrijedi  $n = 10$ , ukoliko se građevine analiziraju kao samostojeće te  $n = 15$  ako se analiziraju kao jedinice bloka.

Na slici 2 prikazana je usporedba indeksa oštjetljivosti građevina u Donjem gradu koje su analizirane kao samostojeće te kao dijelovi bloka. Radi se uglavnom o zidanim četverokatnicama koje datiraju s prijelaza s 19. na 20. stoljeće. Ukupno pet građevina u promatranim blokovima su armiranobetonske (7 % jedinica). S obzirom da su nakon potresa na tim jedinicama zabilježena manja oštećenja (površinske pukotine i otpadanje žbuke), oštjetljivost tih građevina nije procijenjena. Njihov utjecaj na ponašanje zidanih konstrukcija uzet je u obzir. Vidljivo je da je utjecaj međudjelovanja građevina različit za svaku pojedinačnu građevinu. Utjecaj bloka se ispostavio negativan za 15 % ukupnog broja analiziranih građevina.

Na slici 3 opisana je učestalost pojedinih razreda za parametre opisane u tablici 1, za skupinu građevina u Donjem gradu u Zagrebu. Prema [13], može se zaključiti da je riječ uglavnom o građevinama nepravilnog tlocrta, koje se nalaze na mekom tlu, s nosivim elementima dominantnima u jednom smjeru, jednoliko raspodijeljenom masom te deformabilnim stropnim konstrukcijama. Radi se o građevinama kojima nedostaje takozvani "efekt kutije" [14].



Slika 2. Rezultati procjene oštećljivosti



Slika 3. Klasifikacija građevina

Na temelju volumena  $Vol_{SU}^i$  i indeksa oštećljivosti  $V_i^{SU}$  jedinica bloka, moguće je izraziti indeks oštećljivosti bloka, prema izrazu (3):

$$V_{i,agg} = \sum_{i=1}^n \left( V_i^{SU} \cdot \frac{Vol_{SU}^i}{Vol_{agg.}} \right) \quad (3)$$

gdje je  $Vol_{agg.}$  volumen bloka [15].

Prema europskoj makroseizmičkoj ljestvici (EMS-98) definirano je šest razreda oštećenja konstrukcija D0, D1, D2, D3, D4 te D5. Razred D0 opisuje konstrukciju bez oštećenja, D1 uključuje površinske pukotine na malom broju zidova i otpadanje žbuke. Razred D2 podrazumijeva oštećenja konstruktivnih te značajna oštećenja nekonstruktivnih elemenata; otpadanje žbuke i pukotine na većini zidova. Razred D3 podrazumijeva značajna konstruktivna te teška nekonstruktivna oštećenja; ošte-

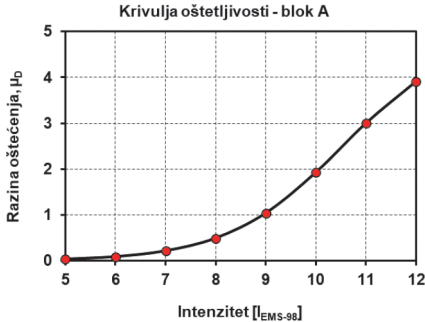


čene zabatne zidove, dimnjake. Razred D4 uključuje ozbiljna oštećenja međukatnih i krovnih konstrukcija, dok D5 predstavlja otkazivanje konstrukcije.

Ovisno o indeksu oštećljivosti konstrukcije (bloka)  $V_p$ , intenzitetu potresa  $I$  i duktilnosti konstrukcije (bloka)  $Q$ , moguće je odrediti očekivani razred oštećenja konstrukcija [12] prema izrazu (4):

$$\mu_D = 2,5 \cdot \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6,25 \cdot V_p - 13,1}{Q} \right) \right] \quad (4)$$

Indeksom oštećljivosti i faktorom duktilnosti opisuje se konstrukcija, dok je jakost potresa opisan intenzitetom. Faktor duktilnosti poprima vrijednost u rangi između 1 – 4, no za zidane konstrukcije obično se uzima s vrijednošću 2,3 [16]. Iako se jakost potresa može objektivnije opisati magnitudom prilikom procjene oštećljivosti, često zbog nedostatka podataka (pogotovo ako se radi o povijesnim potresima i pripadnoj šteti), koristi se intenzitet potresa. Obično se izražava pomoću Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS) ljestvice. Rezultati se najčešće opisuju uz pomoć krivulja oštećljivosti ili krivulja ranjivosti. Krivulje oštećljivosti opisuju korelaciju između intenziteta potresa i razreda oštećenja za određeni indeks oštećljivosti (slika 4). Ako su dostupni podaci o oštećenjima nakon potresa, rezultate je potrebno kalibrirati [12].

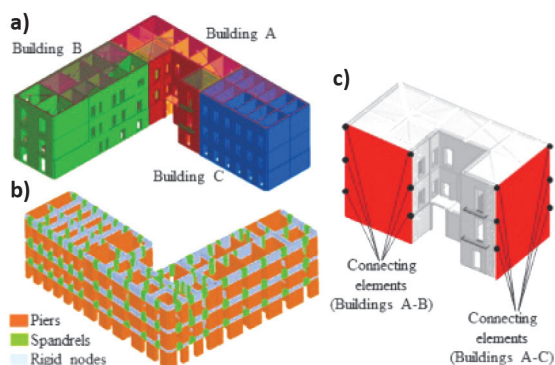


Slika 4. Krivulja oštećljivosti

Krivulje ranjivosti opisuju vjerojatnost prekoračenja određene razine oštećenja ovisno o vršnom ubrzanju tla. Moguće ih je razviti na temelju matrice vjerojatnosti oštećenja. Za definiranje matrice vjerojatnosti oštećenja uglavnom se koristi binomna raspodjela koja se temelji na rezultatima pregleda građevina nakon potresa [17].

### 3 Analitički pristup

Za razliku od makroseizmičkog, za primjenu analitičkog pristupa potrebno je imati veoma detaljan uvid u geometrijske, materijalne te konstruktivne karakteristike konstrukcije [18]. Potrebno je osigurati pristup svim relevantnim informacijama o građevini, uključujući originalnu projektnu dokumentaciju, dokumentaciju o rekonstrukcijama, adaptacijama, podatke o tlu, itd. S obzirom da se analitički pristup temelji na simulaciji potresnih pobuda, konstrukciju je potrebno adekvatno modelirati i opteretiti (Slika 5). Postoje brojni primjeri modeliranja zidanih konstrukcija nakon potresa, a u posljednje vrijeme objavljeno je i nekoliko studija slučaja relevantnih za Hrvatsku, odnosno studija slučaja nakon zagrebačkog potresa [19-24].



Slika 5. Modeliranje jedinica bloka [25]

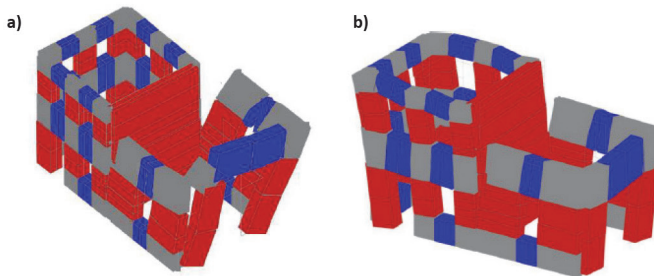
Za simulaciju potresnog opterećenja moguće je koristiti linearnu statičku ili dinamičku analizu te nelinearnu statičku (pushover) ili dinamičku (time history) analizu. Ipak, zbog svoje praktičnosti i točnosti prevladava uporaba nelinearne statičke metode. Kapacitet konstrukcije izražava se pomoću pushover krivulje (krivulje sposobnosti nosivosti), ona opisuje odnos između poprečne sile u podnožju građevine (base shear) i pomaka kontrolnog čvora. Analiza se provodi za oba smjera ( $x$  i  $y$ ). Temeljna pretpostavka metode je da konstrukcija vibrira u prvom modu što je i ujedno nedostatak metode jer je uglavnom primjenjiva na pravilne zgrade koje imaju dominantan odziv u prvom obliku titranja. Kod visokih zgrada i tlocrtno nesimetričnih građevina ne daje dobre rezultate. Nelinearna dinamička metoda u vremenu ili *time* – *history* najpreciznija je i najsloženija metoda za proračun seizmičkih djelovanja [25]. Opterećenje je pobuda potresom, zapis ubrzanja tla u vremenu – akcelrogram. Prednost metode je mogućnost modeliranja nelinearnog ponašanja materijala, geometrijske nelinearnosti, definiranje prigušenja itd. No, zbog vrlo velikog broja pretpostavki u svim fazama proračuna, od ubrzanja tla do nelinearnog modeliranja u inženjerskoj se praksi rijetko koristi.

Razine oštećenja moguće je definirati ovisno različitim varijablama: međukatnom pomaku, pomaku kontrolnog čvora itd. Tablica 2 prikazuje razine oštećenja definirane ovisno o pomaku kontrolnog čvora, gdje je  $D_y$  pomak na granici popuštanja, a  $D_u$  pomak pri slomu.

Tablica 2. Razine oštećenja [13]

Razina oštećenja		
D1	Blago	$0,7 D_y$
D2	Umjereno	$D_y$
D3	Značajno	$D_y + 0,5(D_u - D_y)$
D4 - D5	Otkazivanje	$D_u$

Jedinice bloka moguće je modelirati kao samostojeće građevine (uz određene modifikacije kojima se smanjuje pogreška), kao potpuno povezane građevine ili pomoću veza kojima se simulira njihova interakcija. Pristup modeliranja jedinica kao da su potpuno neovisne se često odvija zbog nedostupnosti podataka o susjednim građevinama, financijskih ili vremenskih ograničenja. Takav pristup je u velikom broju slučajeva konzervativan, no ako se model izrađuje s ciljem popravka konstrukcije, rezultati nisu mjerodavni. Naime, odzivi različitih modela se razlikuju [26]. Na slici 6 prikazani su mehanizmi otkazivanja različito modelirane konstrukcije.



Slika 6. Mehanizmi otkazivanja [26]: a) model s nezavisnim jedinicama, b) model s modeliranim vezama između jedinica

## 4 Zaključak

U prethodne dvije godine, područje Hrvatske bilo je pogođeno nizom potresa. S obzirom da je potres izvanredno djelovanje, potresni rizik je tema koja je u široj javnosti godinama bila zanemarena. Zagrebački potres 2020., uzrokovao je veliku štetu, pogotovo u gradskoj jezgri – najčešća oštećenja odnosila su se na srušene dimnjake, zabatne tavanske zidove i krovništa. Do oštećenja tradicijskih zidanih zgrada je došlo zbog neravnomjerne raspodjele krutosti, slabih ili nepostojećih međusob-

nih veza te loše povezanosti s međukatnom ili krovnom konstrukcijom. Velik dio građevinskog fonda Hrvatske čine upravo (nearmirane) zidane konstrukcije, a pogotovo se mogu pronaći u gradskim jezgrama gdje formiraju blokove. Stoga, s ciljem definiranja potresnog rizika, u radu su analizirana dva pristupa procjene oštetljivosti. Procjena oštetljivosti značajna je za određivanje ljudskih i ekonomskih gubitaka. Metoda indeksa oštetljivosti je metoda koja se temelji na kvantificiranju određenih karakteristika promatrane građevine. Primarno se odnosila na samostojeće građevine, a naknadno je proširena te je primjenjiva na građevine koje formiraju blokove. Praktična je za procjenu oštetljivosti velikog broja građevina (na lokalnoj, urbanoj, regionalnoj razini...) zbog brzine primjene metode, količine potrebnih informacija te količini nesigurnosti i pretpostavki koje uspješno "podnosi". S druge strane, analitički pristup mnogo je precizniji, ali i kompleksniji te zahtijeva mnogo više vremena. Implementacija analitičkog pristupa na većoj teritorijalnoj razini nije realna, s obzirom da uključuje seizmički proračun (koji za građevine u bloku još uvijek nije definiran u normama).

## Zahvala

Autori se zahvaljuju Hrvatskoj zakladi za znanost na financijskoj potpori istraživanja kroz projekt ARES: Procjena stanja i obnova postojećih građevina – Razvoj suvremenih metoda za zidane i drvene konstrukcije (UIP-2019-04-3749).

## Literatura

- [1] Atalić, J., Šavor Novak, M., and Uroš, M., Seismic risk for Croatia: Overview of research activities and present assessments with guidelines for the future, *Građevinar*, vol. 71, no. 10. Union of Croatian Civil Engineers and Technicians, pp. 923–947, 2019. doi: 10.14256/JCE.2732.2019.
- [2] Moufid, M., Mohamed, F., and Noroozinejad, E., The seismic vulnerability assessment methodologies : A state-of-the-art review, *Ain Shams Eng. J.*, vol. 11, no. 4, pp. 849–864, 2020, doi: 10.1016/j.asej.2020.04.001.
- [3] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Sigmund, Z., Baniček, M., Demšić, M., and Hak, S., Post-earthquake damage assessment of buildings - Procedure for conducting building inspections, *Građevinar*, vol. 72, no. 12, pp. 1089–1115, 2021, doi: 10.14256/JCE.2969.2020.
- [4] Stepinac, M., Lourenço, P. B., Atalić, J., Kišiček, T., Uroš, M., Baniček, M., and Šavor Novak, M., Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 56, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102140.

- [5] Baquedano, P., Tiago, J., and Ferreira, M., *From single - to multi - hazard vulnerability and risk in Historic Urban Areas : a literature review*, no. 0123456789. Springer Netherlands, 2021. doi: 10.1007/s11069-021-04734-5.
- [6] Formisano, A., Mazzolani, F. M., Florio, G., Landolfo, R., De Masi, G., Priscoli, G. D., and Indirli, M., Seismic vulnerability analysis of historical centres: A GIS application in Torre del Greco, *COST ACTION C26 Urban Habitat Constr. under Catastrophic Events - Proc. Final Conf.*, no. September, pp. 583–588, 2010.
- [7] Hrvatski centar za potresno inženjerstvo. <https://www.hcpi.hr>.
- [8] Državni arhiv u Zagrebu. <http://daz.hr/>
- [9] Petrini, V. and Benedetti, D., A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings, 1984.
- [10] Chieffo, N. and Formisano, A., Comparative Seismic Assessment Methods for Masonry Building Aggregates: A Case Study, *Front. Built Environ.*, vol. 5, no. October, 2019, doi: 10.3389/fbuil.2019.00123.
- [11] Formisano, A., Mazzolani, F. M., Florio, G., and Landolfo, R., A quick methodology for seismic vulnerability assessment of historical masonry aggregates, 2010, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/266617700\\_A\\_quick\\_methodology\\_for\\_seismic\\_vulnerability\\_assessment\\_of\\_historical\\_masonry\\_aggregates](https://www.researchgate.net/publication/266617700_A_quick_methodology_for_seismic_vulnerability_assessment_of_historical_masonry_aggregates)
- [12] Chieffo, N. and Formisano, A., Induced Seismic-Site Effects on the Vulnerability Assessment of a Historical Centre in the Molise Region of Italy : Analysis Method and Real Behaviour Calibration Based on 2002 Earthquake, *Geosci.*, vol. 10, no. 21, 2020, doi: 10.3390/geosciences10010021.
- [13] Chieffo, N., Clementi, F., Formisano, A., and Lenci, S., Comparative fragility methods for seismic assessment of masonry buildings located in Muccia (Italy), *J. Build. Eng.*, vol. 25, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100813.
- [14] Stepinac, M., Rajčić, V., and Barbalić, J., Influence of long term load on timber-concrete composite systems, *Gradjevinar*, vol. 67, no. 3, pp. 235–246, 2015, doi: 10.14256/JCE.1170.2014.
- [15] Formisano, A., Mochi, G., and Chieffo, N., Empirical and mechanical analysis methods for seismic vulnerability assessment of clustered buildings of historical centres: A case study, *COMPADYN Proc.*, vol. 2021-June, no. January, 2021, doi: 10.7712/120121.8486.19053.
- [16] Lagomarsino, S., On the vulnerability assessment of monumental buildings, *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 445–463, 2006, doi: 10.1007/s10518-006-9025-y.
- [17] Chieffo, N. and Formisano, A., The Influence of Geo-Hazard Effects on the Physical Vulnerability Assessment of the Built Heritage : An Application in a District of Naples, no. January, 2019, doi: 10.3390/buildings9010026.

- [18] Stepinac, M., Kisicek, T., Renić, T., Hafner, I., and Bedon, C., Methods for the assessment of critical properties in existing masonry structures under seismic loads-the ARES project, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 5. MDPI AG, Mar. 01, 2020. doi: 10.3390/app10051576.
- [19] Milić, M., Stepinac, M., Lulić, L., Ivanišević, N., Matorić, I., Čačić Šipoš, B., and Endo, Y., Assessment and Rehabilitation of Culturally Protected Prince Rudolf Infantry Barracks in Zagreb after Major Earthquake, *Buildings*, vol. 11, no. 11, p. 508, Oct. 2021, doi: 10.3390/buildings11110508.
- [20] Lulić, L., Ožić, K., Kišiček, T., Hafner, I., and Stepinac, M., Post-earthquake damage assessment-case study of the educational building after the zagreb earthquake, *Sustain.*, vol. 13, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/su13116353.
- [21] Moretić, A., Stepinac, M., and Lourenço, P. B., Seismic upgrading of cultural heritage – A case study using an educational building in Croatia from the historicism style, *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, no. May, p. e01183, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01183.
- [22] Pojatina, J., Barić, D., Anđić, D., and Bjegović, D., Structural renovation of residential building in Zagreb after the 22 March 2020 earthquake, *Gradjevinar*, vol. 73, no. 6, pp. 633–648, 2021, doi: 10.14256/JCE.3195.2021.
- [23] Perić, L. and Matorić, I., Reliability of traditional timber-floor masonry buildings to seismic action, *Gradjevinar*, vol. 72, no. 10, pp. 869–893, 2020, doi: 10.14256/JCE.2965.2020.
- [24] Hafner, I., Lazarević, D., Kišiček, T., and Stepinac, M., Post-Earthquake Assessment of a Historical Masonry Building after the Zagreb Earthquake–Case Study, *Buildings*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/buildings12030323.
- [25] Angiolilli, M., Lagomarsino, S., Cattari, S., and Degli Abbati, S., Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate, *Eng. Struct.*, vol. 247, p. 113218, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113218.
- [26] Tomić, I. *et al.*, Seismic Testing of Adjacent Interacting Masonry Structures, 2021, doi: 10.23967/sahc.2021.234.





# Procjena seizmičke otpornosti zidanih zgrada uporabom vizualnog programiranja prema normativno propisanim kriterijima pravilnosti konstrukcije

Karlo Ožić<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Mislav Stepinac<sup>2</sup>, Anthony Ninčević<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Green Tech Construction d.o.o., anthony@greentech.hr

## Sažetak

U Europi, a tako i u Hrvatskoj, tema procjene seizmičke otpornosti veoma je aktualna zbog nedavnih događaja koji su utjecali na podizanje svijesti. U ovom radu prikazana je mogućnost uporabe modernih alata pri procjeni jednostavne seizmičke otpornosti građevina. Koristeći Grasshopper, parametarski programski paket sadržan u Rhinoceros 3D-u, analizira se utjecaj konceptualnog oblikovanja na ponašanje konstrukcije. Provodi se analiza geometrijskih karakteristika konstrukcija prema kriterijima pravilnosti postavljenih u Eurokodu 1998-1. Najbitniji ispitani parametri su simetrija, kompaktnost, vitkost tlocrta i ekscentričnost konstrukcije. Također, rad je fokusiran na optimizaciju tlocrta postojećih konstrukcija. Cilj optimizacije je smanjenje udaljenosti između centra mase i centra krutosti tlocrta zgrade kako bi se smanjio utjecaj torzije na konstrukciju. U radu se ispituju mogućnosti korištenja parametarskog programiranja te se postavljaju temelji za daljnje istraživanje. *Ključne riječi: procjena stanja, parametarsko programiranje, Grasshopper, potres, seizmička otpornost, konceptualno oblikovanje, zidane konstrukcije*

## Use of visual programming in seismic assessment of masonry buildings according to normatively prescribed criteria of construction regularity

### Abstract

In Europe, as well as in Croatia, the topic of seismic resistance assessment is very relevant due to a large number of seismically active areas. This paper presents the possibility of using modern tools in assessing the seismic resistance of buildings. Using Grasshopper, a parametric software package contained in Rhinoceros 3D, the impact of conceptual design on structural behavior is analyzed. The analysis of geometrical characteristics of structures according to the regularity criteria set in Eurocode 1998-1 is carried out. The most important examined parameters are symmetry, compactness, slenderness of the floor plan and eccentricity of the construction. Also, the work is focused on optimizing the floor plan of existing structures. The goal of optimization is to reduce the distance between the center of mass and the center of rigidity of the building floor plan in order to reduce the impact of torsion on the structure. The paper examines the possibilities of using parametric programming and lays the foundations for further research.

*Key words: assessment, parametric programming, Grasshopper, earthquake, seismic resistance, conceptual design, masonry constructions*

## 1 Uvod

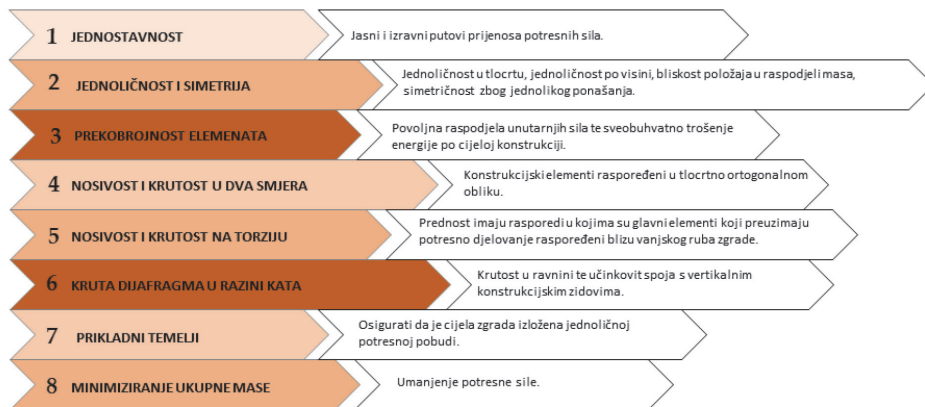
Potaknuti s nedavnim potresima u Hrvatskoj, odnosno Zagrebu (magnituda  $M_L = 5,5$ , intenziteta VII, u epicentru, prema EMS-98 skali [1]), Petrinji i okolici u 2020. (magnituda  $M_L = 6,2$ , intenziteta VIII-IX, u epicentru, prema EMS-98 skali [2]), pojavila se velika potreba za brzim i upotrebljivim procjenama postojećih građevina [3]. Prema rezultatima istraživanja Statističkih godišnjaka, građevinski fond Hrvatske sastoji se od više od 75 % građevina koje su starije od 30 godina te 40 % građevina starijih od uporabnog životnog vijeka koji iznosi 50 godina. Uz to, na područjima pogođenih potresom postoji veliki dio povijesnih zidanih građevina (većina starijih od 50 godina) [4] koje su još jednom pokazale znatnu podložnost teškim oštećenjima pri djelovanju potresa. Ubrzo nakon potresa, ukazala se potreba za jednostavnim i brzim metodama za procjenu postojećih građevina [5], a koje će u dostatnoj mjeri prikazati indikativno ponašanje promatranih građevina. Nakon nedavnih potresa donesen je Zakon o obnovi [6] u kojem inženjeri moraju dokazati ponašanje zidanih konstrukcija na pobudu potresa kroz elaborat ocjene postojećeg stanja. Potrebno je adekvatno modelirati i opteretiti konstrukciju kako bi je analitički pristupom provjerili. Nakon zagrebačkog potresa objavljeno je nekoliko relevantnih studija slučajeva s primjerima modeliranja zidanih konstrukcija [7-12]. Naposljetku, ako konstrukcija nije u skladu sa zahtjevima postavljenim u [13], potrebno je napraviti i projekt sanacije. U svrhu učinkovitijeg procesa, automatiziranja i implementacije tehnologije u proces procjene, razvijena je ideja brze analize konstrukcijskih parametara građevine pomoću geometrijskih zahtjeva definiranih u konstrukcijskim Eurokodovima [14] te posebno u hrvatskom nacionalnom dodatku [15]. Također, takva analiza bi dala brzu povratnu informaciju arhitektima i građevinskim inženjerima o rasporedu zidova, površini zidova i konceptualnom oblikovanju građevine. Pomoću rezultate analize olakšao bi se proces odabira najprikladnijih zidova za optimizaciju tlocrta što bi svakako dovelo do uštede vremena u projektiranju i izravnog smanjenja troškova.

## 2 Konceptualno oblikovanje u seizmičkim područjima

Konceptualno oblikovanje u seizmičkim područjima temelji se na načelima i zahtjevima postavljenim u Eurokodu 1998-1 [14] "Kriteriji pravilnosti konstrukcije" prikazanom grafički na slici 1.

Poseban osvrt dan je na točku 4.2.3.2. "Kriterij pravilnosti u tlocrtu" [14]. Na temelju analize uvjeta pravilnosti tlocrta prikazan je utjecaj oblika tlocrta i rasporeda zidova na ponašanje zgrade u potresu fokusirajući se analizu perioda različitih tlocrtnih oblika. Kriterij pravilnosti u tlocrtu navodi da zgrade koje su kategorizirane kao pravilne u tlocrtu moraju ispuniti sve uvjete navedene u točki 4.2.3.2. [14]. Obzirom da se ovaj rad bavi zidanim zgradama, potrebno je istaknuti i "Posebna pravila za

zidane zgrade“ koja određuju tlocrtne uvjete koje zidana zgrada mora ispunjavati, a to su u skladu s Eurokodom [15]: a) tlocrtni raspored nosivih elemenata mora biti kompaktan, b) omjer između duljine manje strane i duljine duge strane u tlocrtu ne smije biti manji od minimalne vrijednosti,  $\lambda_{\min} = 0,25$ , c) površina projekcija udubljenja iz pravokutnog oblika ne smije biti veća od postotka  $p_{\max} = 15$  % ukupne površine poda iznad razmatrane razine.



Slika 1. Kriteriji pravilnosti konstrukcije iz Eurokoda 1998-1 [14]

### 3 Parametarski model

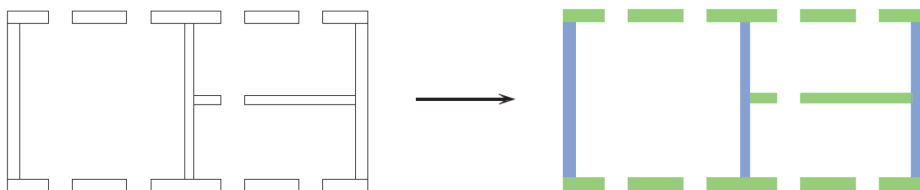
Parametarsko modeliranje vuče duboke korijene iz povijesti arhitekture i odnosi se na rješavanje problema u kojem se objekti diskretiziraju na parametre i parametarske jednadžbe koje definiraju odnos između ulaznih i izlaznih varijabli koje utječu na oblikovanje objekta. U kasnom 19. stoljeću arhitekti kao što su Antoni Gaudi i Frei Otto započinju korištenje parametarskog modeliranja u Europi. Koristili su ga kako bi projektirali složene konstrukcije koje se ne mogu dobiti ručnim proračunima. Za parametarsko programiranje korišten je vizualni programski jezik i softverski paket Grasshopper koji se temelji Microsoftovim programskim jezicima VB.NET i C # (C oštro) i postoji kao dodatak Rhinoceros 3D. Skup komponenti koje su povezane jedna s drugom preko ideje “box and arrow” čine smislenu cijenu programa. Primjenu programskog paketa već možemo vidjeti u području procjene zidanih konstrukcija s nekim drugačijim pristupom [16, 17].

Kako bi se analizirale razne karakteristike zgrade, parametarski model se sastoji od skupina komponenti od kojih svaka provodi određenu vrstu provjere:

- Karakteristike elemenata tlocrta
- Proračun središta mase zgrade
- Proračun središta krutosti zgrade
- Proračun vitkosti zgrade

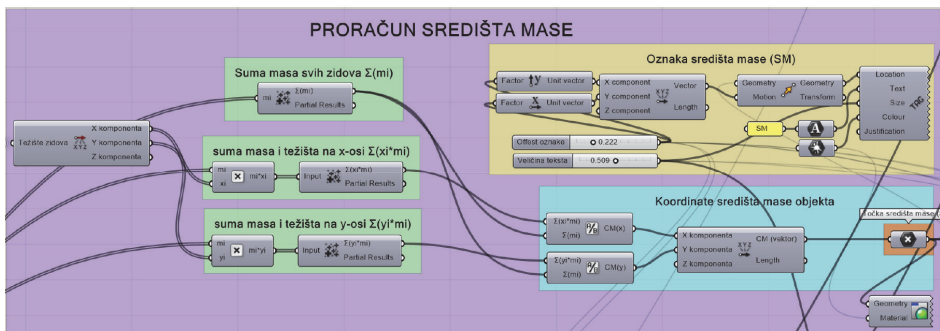
- Funkcija pojačanja zidova + optimizacija tlocrta
- Proračun jednolikosti zgrade
- Provjera minimalne ukupne površine nosivih zidova u oba glavna smjera
- Provjera proračunske debljine zidova
- Provjera omjera visine zida i njegove proračunske debljine
- Provjera omjera proračunske visine i proračunske debljine zida
- Kompaktnost tlocrta
- Proračun vlastitih frekvencija – modul Karamba
- Ispis rezultata – modul Pterodactyl.

Jedini dio procesa koji korisnik obavlja ručno je analiza tlocrta. Analizom uvezenog tlocrta u Rhino, korisnikov dio posla završava izuzev unošenja nekoliko parametara za kasniji proračun. Podaci za sve provjere su instantni bez dodatnih ručnih proračuna ili daljnjeg uplitanja u proces. Zidovi unutar tlocrta se moraju prilagoditi sintaksi kojom ih Grasshopper analizira. Obzirom da se analiziraju samo nosivi zidovi, svi zidovi koji ne doprinose nosivosti na horizontalne sile su uklonjeni s tlocrta. Nakon toga je potrebno zidove podijeliti na zidove koji se pružaju u x-smjeru i y-smjeru (slika 2). Na početku provjera potrebno je iz tlocrta dobiti izlazne parametre. Nakon definiranja geometrijskih podataka može se nastaviti u provjeru ostalih komponenti. Iz dobivenih podataka može se proračunati središte mase (slika 3) i središte krutosti tlocrta.



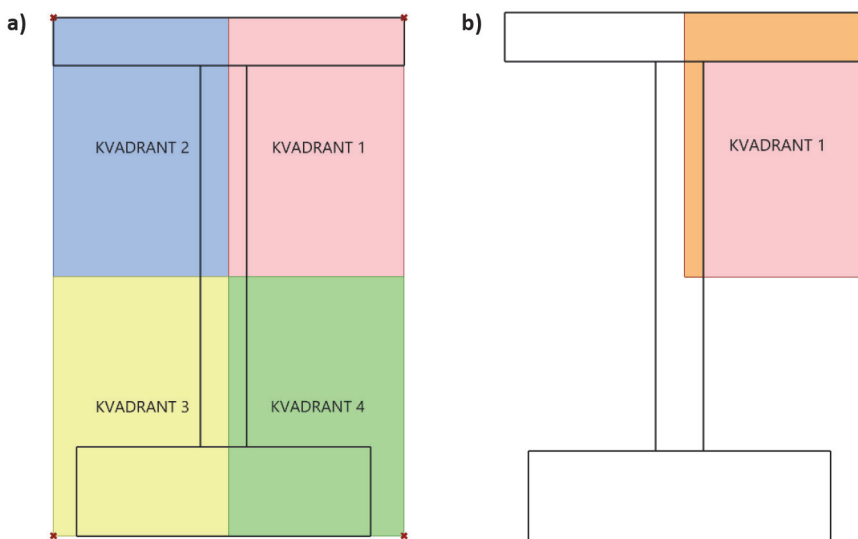
Slika 2. Zidovi u x (zeleno) i y smjeru (plavo)

Također, s tim podacima se može izračunati udaljenost između središta mase i krutosti. Što je ta udaljenost veća, tj., što je vektor udaljenosti između dvije točke veći, postoji i velika mogućnost izrazito nepovoljne torzije objekta prilikom djelovanja horizontalnih pobuda. Ako projektant smatra da je udaljenost prevelika, konstrukciju je moguće pojačati, odnosno jedna od opcija je optimizacija tlocrta. Funkcija optimizacije tlocrta kao ulazni podatak prima listu sa svim zidovima u tlocrtu. Primarna namjena funkcije je izolirati bilo koji zid indexa ( $i$ ) iz liste sa  $n$  elemenata, povećati njegovu širinu i vratiti ga nazad u listu tako da zamijeni prvotni element koji se pojačava. Jednom kad se izolira zid, manipulira se dimenzijama tako da se manja dimenzija (širina) poveća za  $\Delta x$ , vrijednost koju zada korisnik. Na taj način smanjuje se udaljenost između središta mase i krutosti čime se optimizira tlocrt i ponašanje građevine.



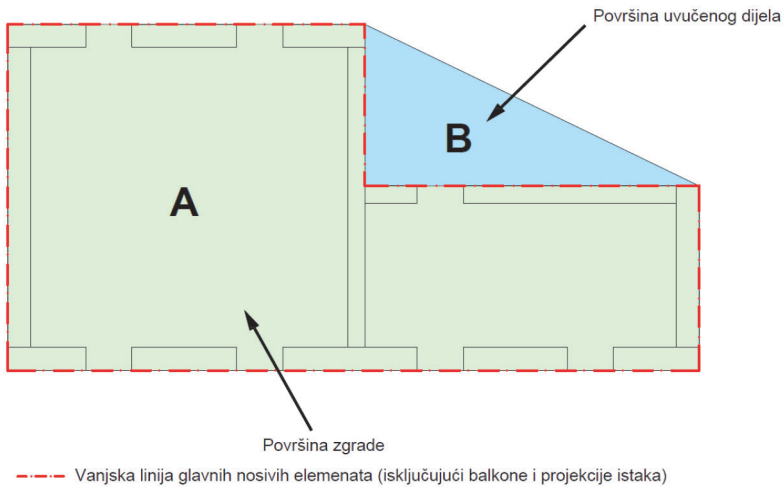
Slika 3. Prikaz sučelja za komponentu “Proračun središta mase”

Sljedećim korakom provjerava se jednoličnost (slika 4) i kompaktnost građevine (slika 5). Za provjeru, jednoličnost zgrada se dijeli u četiri dijela (slika 4.a) te se za svaki kvadrant gleda površina zidova unutar tog kvadranta (slika 4.b). Ako se površine zidova u dva kvadranta u odnosu na os x ili y razlikuju manje od 10 % od druga dva kvadranta, presjek se smatra jednoličnim. Ovaj postotak nije definiran normom te je podložan i drugačijim interpretacijama. Kompaktnost građevine se provjerava jednostavnim zahtjevom prema Eurokodu HRN EN-1998-1:2011 [14]. Površina uvučenog dijela građevine mora biti manja od 5 % ukupne površine građevine. Potrebne geometrijske zahtjeve za zidove prema Eurokodu može se vidjeti u tablici 1. Također, uzima se u obzir i zahtjev iz Nacionalnog dodatka [18] za minimalnu površinu poprečnih presjeka nosivih zidova u svakom smjeru izražene kao postotak bruto površine kata za “jednostavne zidane zgrade”.



Slika 4. Jednoličnost građevine





**Slika 5. Kompaktnost građevine ( $B/A < 5\%$  - građevina je kompaktna) [14]**

**Tablica 1. Preporučeni geometrijski zahtjevi za nosive zidove[14]**

Tip zida	$t_{ef,min}$ [mm]	$(h_{ef}/t_{ef})_{max}$	$(l/h)_{min}$
Nearmirano sa zidnim elementima od prirodnog kamena	350	9	0,
Nearmirano sa svim drugim tipovima zidnih elemenata	240	12	0,4
Nearmirano sa svim drugim tipovima zidnih elemenata za malu seizmičnost	170	15	0,35
Omeđeno zižde	240	15	0,3
Armirano zižde	240	15	nema ograničenja

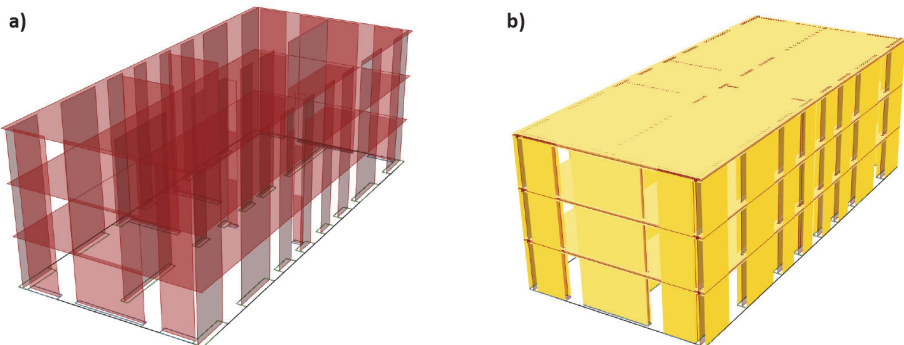
Upotrijebljeni simboli imaju sljedeće značenje:  
 $t_{ef}$  – debljina zida (vidjeti normu EN 1996-1-1:2004),  $h_{ef}$  – proračunska visina zida (vidjeti normu EN 1996-1-1:2004),  $h$  – veća svijetla visina otvora uz zid,  $l$  – duljina zida

Ako nosivi zidovi ispunjavaju sve geometrijske zahtjeve, sljedeći korak je izračunavanje vlastitih oblika i frekvencija. Kako bi ih mogao izračunati, korisnik postavlja nekoliko ulaznih parametara. Budući da se radi o nosivim zidovima koji se protežu od podnožja do vrha zgrade, moguće je podići cijeli model zgrade definiranjem sljedećih ulaznih parametara: katnost, visina svake etaže, visina (debljina) zgrade, ploča i broj izračunatih modova. Nakon 3D modela (slika 6.a) s točnim rasporedom zidova, ploča, visina poda i katova potrebno je definirati još nekoliko stvari. Debljine zidova se automatski učitavaju s popisa tlocrtnih zidova, a za definiranje elementa potrebno je definirati njegov presjek i spojiti ga s ravnim površinama zidova i ploča u ravninskom modelu. Na taj se način od elemenata konstruira mrežasti model koji

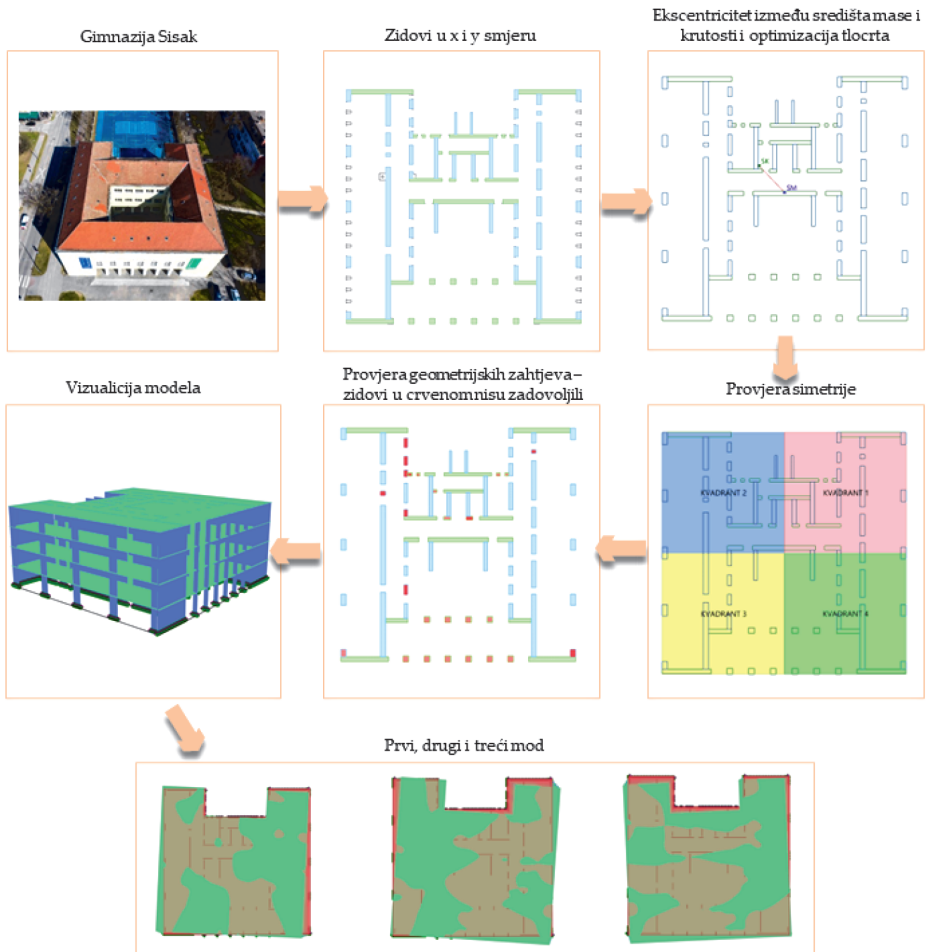
zahtijeva definiranje ležajeva kako bi se dobio konačni model (slika 6.b). Za prikaz rezultata nakon analize, izabran je plug-in Karamba [19] koji nudi module s kojima se mogu vizualizirati načini vibracija zgrade i deformacije točaka u sva 3 glavna smjera koordinatnog sustava. Za ispis rezultata u pdf formatu, modul Pterodactyl prima izlazne parametre funkcija koje želimo ispisati kao ulazne parametre. Svi rezultati s gore navedenim uvjetima ispisuju se, automatski u stvarnom vremenu, u odnosu na odabrani tlocrt.

## 4 Studija slučaja

Današnja zgrada Gimnazije Sisak sagrađena je tridesetih godina prošlog stoljeća. Škola s atrijem u središnjem dijelu ukupne je površine cca 1.500 m<sup>2</sup>. Zgrada Gimnazije Sisak je zidana i ima podrum, prizemlje i dva kata. Svi nosivi zidovi izvedeni su od pune opeke starog formata 29 (30) × 15 (14) × 6,5 cm, debljine zidova su 60 i 80 cm u podrumu, te 50 i 60 cm u prizemlju i na katu. Pregradni zidovi su izrađeni od šuplje blok opeke debljine 15 cm. Na slici 7 prikazan je tijek rada u softveru te izlazni podaci nakon analize građevine.



Slika 6. Ravninski model i krajnji model



Geometrijski zahtjevi nisu zadovoljeni	Ekscentricitet između CM i CK	Simetrija	Kompaktan oblik	Površina zidova	Torzijski nefleksibilan
25 zidova	5, 6 m	X smjer ✘ Y smjer ✔	✔	X smjer ✔ Y smjer ✘	✔

Slika 7. Tijek rada za studiju slučaja

## 5 Zaključak

Zidane konstrukcije se i danas grade radi raznih prednosti poput vatrootpornosti, toplinske i zvučne izolacije te naposljetku ekonomskih aspekata. Oko 70 % građevina u svijetu izvedeno je kao zidane konstrukcije [20], a slična procjena vrijedi i u Hrvatskoj. Svakako treba uzeti u obzir da je u Hrvatskoj velika većina zidanih građevina izvedena prije prvih potresnih normi (1960-tih) te su uglavnom građene bez betonskih elemenata u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Iz tog razloga su nam nedavni potresi u Zagrebu i Petrinji ponovno pokazali potrebu što brže provjere sigurnosti i upotrebljivosti zgrada. Obzirom na sporiji razvoj i primjenu tehnologije u građevinskom sektoru, prikazan je nekonvencionalan pristup s primjenom suvremenih alata u analizi zgrada. Predstavljan je primjer automatizacije procesa verifikacije zgrade prema postavljenim seizmičkim zahtjevima. Korišten je Grasshoper softver u kojem je uspješno programiran kod pomoću kojeg se uz jednostavni uvoz podataka kao izlazne podatke dobiva analiza seizmičke otpornosti po kriterijima pravilnosti konstrukcije.

Osim komponenti geometrijskih karakteristika, u razvijeni model se mogu implementirati različiti skupovi podataka. Primjerice, vrijednosti karakteristika materijala dobivene razornim ili polurazornim metodama mogu se vrlo lako ugraditi u postojeće modele. Zanimljiva komponenta od strane građevinske struke bila bi nadogradnja modela različitim tehnikama i materijalima kako bi se pojačala postojeća konstrukcija (npr. FRP, FRCM, itd.). Potresna oštetljivost preko parametarske analize još je jedan od izazova koji se može rješavati parametarskim vizualnim programiranjem. Što se tiče održivosti, dodatni modul koji bi izračunao količinu ugrađenog (ili uklonjenog) CO<sub>2</sub> bio bi vrlo koristan za predstavljanje europskih ciljeva održivog razvoja. Također, implementacija cijene obnove može biti jedna od komponenta modula. Daljnjim razvojem ovog modela moguće je izraditi alat koji će pomoći arhitektima u preliminarnom odabiru tlocrta i rasporeda zidova bez poznavanja principa statičkog proračuna i seizmičkih zahtjeva na konstrukciju. Mogućnosti nadogradnje razvijenog modela su brojne, a model se praktički beskonačno može poboljšavati.

## Zahvala

Autori se zahvaljuju Hrvatskoj zakladi za znanost na financijskoj potpori istraživanja kroz projekt ARES: Procjena stanja i obnova postojećih građevina – Razvoj suvremenih metoda za zidane i drvene konstrukcije (UIP-2019-04-3749).

## Literatura

- [1] Stepinac, M.; Lourenco, P.B.; Atalić, J.; Kišiček, T.; Uroš, M.; Baniček, M.; Šavor Novak, Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020 Mislav. .
- [2] Program mjera obnove zgrada oštećenih potresom, 2021.
- [3] C. Kišiček, T.; Stepinac, M.; Renić, T.; Hafner, I.; Bedon, Methods for the assessment of critical properties in existing masonry structures under seismic loads-the ARES project, Applied Sciences (Switzerland), vol. 10, no. 5. 2020, doi: 10.3390/app10051576.
- [4] Benedetti, D., Benzoni, G., Parisi M.A., Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 16, no. 2, pp. 183–201, Feb. 1988, doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160203>.
- [5] Goretti, A., Di Pasquale, G., An overview of post-earthquake damage assessment in Italy. Earthquake Eng. Res. Inst., Earthquake Eng. Res. Inst. (EERI) Invitational workshop report, Pasadena, CA, USA, 18 pp. 2002, [Online]. Available: [https://www.eeri.org/~eeriorg/lfe/pdf/italy\\_molise\\_goretti\\_pasadena\\_paper.pdf](https://www.eeri.org/~eeriorg/lfe/pdf/italy_molise_goretti_pasadena_paper.pdf).
- [6] Law on the Reconstruction of Earthquake-Damaged Buildings in the City of Zagreb, Krapina-Zagorje County and Zagreb County (NN 102/2020). 2020, [Online]. Available: <https://www.zakon.hr/z/2656/Zakon-o-obnovi-zgrada-oštećenih-potresom-na-području-Grada-Zagreba-%2C-Krapinsko-zagorske-županije-%2C-Zagrebačke-županije-%2C-Sisačko-moslavačke-županije-i-Karlovačke-županije>.
- [7] Lulic, L.; Ožić, K.; Kišiček, T.; Hafner, I.; Stepinac, Post-Earthquake Damage Assessment—Case Study of the Educational Building after the Zagreb Earthquake, Sustainability, vol. 13, no. 6353, 2021.
- [8] Hafner, I., Lazarević, D., Kišiček, T., Stepinac M., Post-Earthquake Assessment of a Historical Masonry Building after the Zagreb Earthquake—Case Study, Buildings, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/buildings12030323.
- [9] Milić, M., et al., Assessment and rehabilitation of culturally protected prince rudolf infantry barracks in zagreb after major earthquake, Buildings, vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.3390/buildings11110508.
- [10] Moretić A., Stepinac M., Lourenço, P.B., Seismic upgrading of cultural heritage – A case study using an educational building in Croatia from the historicism style, Case Stud. Constr. Mater., vol. 17, no. May, p. e01183, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01183.
- [11] Perić, Lj., Matorić, I., Pouzdanost tradicionalnih zidanih građevina s drvenim stropovima na potresno djelovanje, vol. 72, pp. 869–893, 2020.
- [12] Pojatina, J. Barić, D. Anđić, D., Bjegović, D., Obnova građevinske konstrukcije stambene zgrade u Zagrebu nakon potresa 22. ožujka 2020., vol. 73, pp. 633–648, 2021.

- [13] Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja, Tehnički propis o izmjeni i dopunama tehničkog propisa za građevinske konstrukcije, vol. 2020, pp. 1–4, 2012.
- [14] HRN EN 1998-1:2011 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1:2004+AC:2009).
- [15] HRN EN 1998-3:2011/NA:2011 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings - National Annex. .
- [16] Funari, M.F., Mehrotra, A., Lourenço, P.B., A tool for the rapid seismic assessment of historic masonry structures based on limit analysis optimisation and rocking dynamics, Applied Sciences (Switzerland), vol. 11, no. 3. pp. 1–22, 2021, doi: 10.3390/app11030942.
- [17] Funari, M.F., Hajjat, A.E., Masciotta, M.G., Oliveira, D.V., Lourenço, P.B., A Parametric Scan-to-FEM Framework for the Digital Twin Generation of Historic Masonry Structures, Sustainability, vol. 13, no. 11088.
- [18] HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings - National Annex. .
- [19] Preisinger, C., Linking structure and parametric geometry, Architectural Design, vol. 83, no. 2. pp. 110–113, 2013, doi: 10.1002/ad.1564.
- [20] Babatunde, S.A., Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers, Compos. Struct., vol. 161, pp. 246–255, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.10.132.



## Učinkovitost detekcije obalne linije pomoću video sustava - primjer plaže Ploče u Rijeci

Hanna Miličević<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Dalibor Carević<sup>2</sup>, dr. sc. Damjan Bujak<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, damjan.bujak@grad.unizg.hr

### Sažetak

Obalni upravitelji i inženjeri sve više trebaju informacije o obalnom stanju za vremensko razdoblje u danima, tjednima i mjesecima. Video sustav se smatra jednom od najpraktičnijih i najpouzdanijih metoda za praćenje prirodnih i antropogenih promjena obalne linije. Postupak uključuje osrednjavanje slika, georeferenciranje, te ekstrapolaciju obalne linije. Ova metoda nam omogućava efikasno proučavanje promjene obalne linije uz relativno nisku cijenu, korelaciju položaja obale s podacima o vjetru i valovima, te promatranje ponašanja plaže prilikom različitih klimatskih uvjeta u stvarnom vremenu.

*Cljučne riječi: video sustav, obalne linije, plaža Ploče, obrada slike, šljunčane plaže*

## Efficiency of shoreline detection by video monitoring systems – the example of Ploče beach in Rijeka

### Abstract

Coastal managers and engineers increasingly need coastal state information at the temporal scale of days to weeks and at the spatial scale of meters to kilometers. One of the most practical and reliable methods for assessing both natural and anthropogenic changes in the coastline is the video monitoring system. The method includes image averaging, georeferencing, and shoreline extrapolation. This technology allows the study of shoreline changes with a relative low cost, correlation of shoreline position with wind and wave data, and real-time monitoring of beach response to specific climatic conditions.

*Key words: video-monitoring system, shorelines, Ploče beach, image processing, gravel beaches*



## 1 Uvod

Mjerenje i praćenje položaja obale jedan je od temeljnih zadataka obalnih istraživača [1]. Osim znanstvene motivacije, kao što je proučavanje stvarnih učinaka morskih oluja, postoji i nekoliko praktičnih primjena povezanih s ovom aktivnošću koje uključuju: 1.) identificiranje i kvantificiranje erozije obale, 2.) procjenu učinka objekata za zaštitu obale i sl., stoga se praćenje ponašanja obale smatra osnovom za cjelokupno inženjersko projektiranje u obalnom području [2]. Od 1927. do 1980. godine, fotografije iz zraka bile su poznate kao jedini izvor proučavanja promjena na obali. Međutim, broj potrebnih fotografija čak i na regionalnoj razini bio je prevelik [3]. Prikupljanje, analiziranje i rektifikacija fotografija je skup proces i oduzima puno vremena [4]. Također, korištenje crno-bijelih fotografija stvara i nekoliko dodatnih problema kao što su: kontrast između kopna i mora koji je minimalan posebno za mutnu vodu, nedostatak geometrijske točnosti, trošak analitičke opreme, potreba za kvalificiranim osobljem i sl. [4]. Uz navedena ograničenja ova metoda je i zastarjela [4]. Jedna od najpraktičnijih metoda u zadnjih nekoliko desetljeća za procjenu prirodnih i antropogenih promjena obale je primjena video nadzora. Tehnologija temeljena na video nadzoru koristi se fotografijama u boji, čime se prevladavaju problemi povezani s prethodnim metodama korištenja crno-bijelih fotografija. Također, korištenje videosnimki za praćenje promjena obalne linije nudi niz prednosti u usporedbi s konvencionalnim sustavima kao što je npr. globalni položajni sustav. GPS sustav za određivanje položaja obalne linije i njezinih promjena se obično vrši jednom ili dva puta godišnje zbog velikih troškova. S obzirom na to da se prirodni položaj obalne linije konstantno mijenja i ovisi o parametrima kao što su morske mijene, valovi i vjetar, takva metoda istraživanja može biti beskorisna za razumijevanje stvarnih pojava [5]. Razvojem digitalne tehnologije, obalni video sustavi omogućavaju automatizirano prikupljanje podataka, te mnogo veći vremenski i prostorni raspon nego što je ranije bilo moguće. Kontinuirano prikupljanje podataka s rezolucijom od nekoliko centimetara do nekoliko metara za plaže duge i do nekoliko kilometara sada se rutinski provodi na lokacijama u Europi, SAD-u, Australiji i Aziji [2]. Video sustav koristi geometrijske tehnike transformiranja i ispravljanja tzv. kosih slika u tlocrtni pogled, te se takve koriste u algoritmima [6] razvijenim za automatsko detektiranje obalne linije [7]. Prvi takav sustav koji omogućuje prikupljanje podataka i ispravljanje deformiranih (dvodimenzionalnih) slika u stvarni (trodimenzionalni) položaj je tzv. "Argus sistem" razvijen od strane Coastal Imaging Lab-a (CIL), državnog Sveučilišta Oregon (<http://cil-www.coas.oregonstate.edu>). Argus sistem se sastoji od niza video kamera spojenih na glavno računalo koje služi kao kontrola sustava i komunikacijska veza između kamera i arhive podataka [9]. Korištenje takvih metoda je olakšalo suočavanje s problemima vezanim za zaštitu obale, plovidbu, rekreaciju i sl. [8]. Nastavno na istraživanje u radu [10] u sklopu BEACHEX projekta, u kojem se pomoću numeričkog

modela morfodinamike određivao transport sedimenta u uzdužnom smjeru s ciljem prepoznajna zona erozije i akumulacije, u ovom radu predstavljena je metoda određivanja položaja obalne linije pomoću koje će se u daljnjem istraživanju računati pronos sedimenta u poprečnom smjeru. Cilj ovog rada je predstaviti efikasnu metodu za praćenje promjene položaja obalne linije prilikom različitih klimatskih uvjeta u stvarnom vremenu iz tzv. timex i orto-ispravljenih fotografija na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče u Rijeci. U sljedećim poglavljima ćemo ukratko opisati mjesto istraživanja, korištenu metodu te dobivene rezultate.

## 2 Materijali i metode

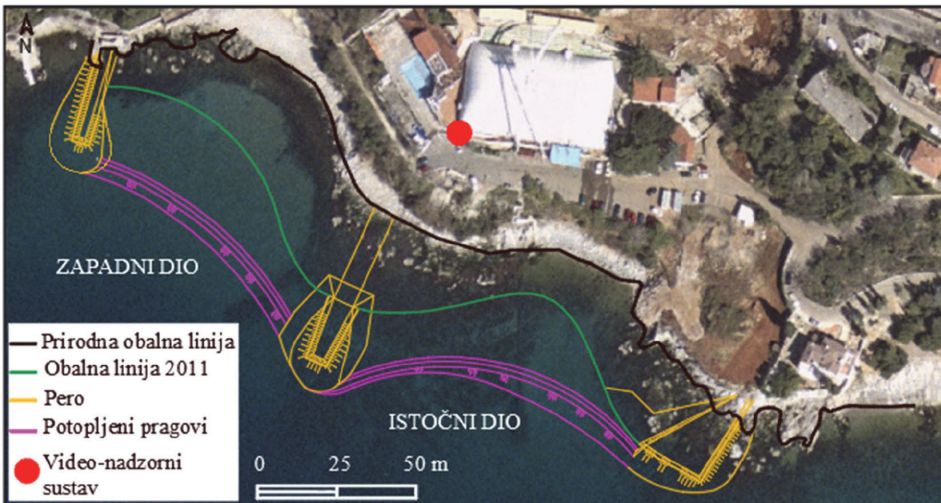
### 2.1 Plaža Ploče

Praćenje promjena obalne linije pomoću video sustava provedeno je na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče, na sjeverozapadnom dijelu grada Rijeke-Kantridi (slika 1. lijevo). To je najveća uređena plaža na riječkom području s površinom od otprilike 14.000 m<sup>2</sup> koja se sastoji se od pješačke staze, te zone iznad šetnice s Mediteranskim biljkama i klupama za odmor. Ukupna duljina plaže iznosi 320 m te je podijeljena s 30 m dugim centralnim perom izvedenim od kamenih blokova (školjera) na "zapadni" i "istočni" dio [10] (slika 2.). Veličina zrna se može klasificirati kao šljunak ( $D_{50} = 16-32\text{mm}$ ), što je tipično za šljunčane plaže u Hrvatskoj [11]. Za stabilizaciju materijala na prirodno strmom terenu, izgrađen je potopljeni prag, s krunom na dubini od 2,5 m ispod mirne razine mora (0 m). Nadomještanje odnesenog i poravnanje premještenog materijala tijekom zimskih mjeseci vrši se neposredno prije turističke sezone, u travnju ili svibnju i u nadležnosti je gradske uprave. Općenito, plaža ima male gubitke materijala tijekom zime te je prosječna vrijednost dohrane od 2015. do 2019. bila 111 m<sup>3</sup> [11].

Vjetrovi slabog do umjerenog intenziteta dominiraju tijekom godine, s povremenim olujnim događajima brzine vjetera koja prelazi i 30 m/s, te rijetko traje više od jednog dana [12]. Za mjerenje valova korišten je valograf tvrtke Datawell na poziciji V1 ( $\phi = 45^{\circ}19,588' \text{ N}$ ;  $\lambda = 14^{\circ}23,738' \text{ E}$ , WGS 84 (slika 1. desno), koji se sastoji od plutače (tipa DWR MKIII) s ugrađenim GPS prijemnikom i digitalnim uređajem za registriranje podataka [10]. Plutača s promjerom od 0,7 m uronjena je na dubinu od 57,5 m od strane Hidrografskog instituta Republike Hrvatske između prosinca 2019. i siječnja 2021. godine, te su na taj način dobiveni valni podatci (značajna valna visina, vršni period, smjer vjetera i temperatura površine mora, te drugi relevantni valni statistički parametri) za projekt BEACHEX.



Slika 1. Google karta Jadranskog mora i južnog Mediterana s naznakom lokacije provedenog istraživanja (slika lijevo), pozicija valografske postaje (slika desno)



Slika 2. Prirodna obalna linija iz zračnih snimaka (1968 g., crna linija), obala umjetno izgrađene plaže 2011 g. (zelena linija), pera (narančasta linija), izgrađeni potopljeni prag (ljubičasta linija), te postavljene video-nadzorni sustav (crveni krug) [13]

## 2.2 Postavljanje kamere

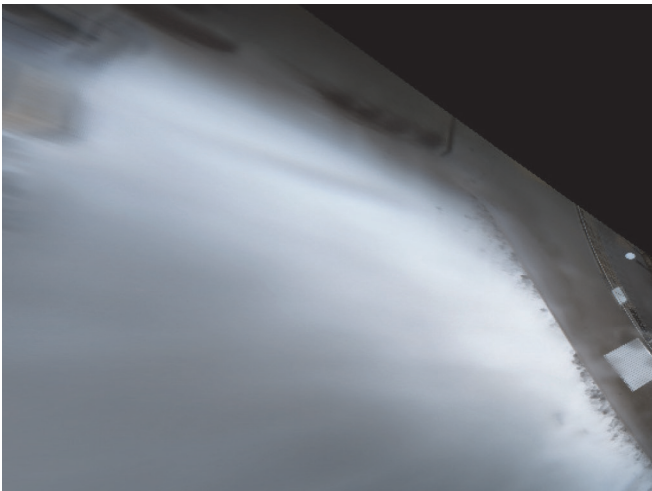
Početak listopada 2020. godine na plaži Ploče postavljen je Argus sustav video-monitoringa plaže, koji se sastoji od dvije kamere na krovu sportsko-rekreativnog zabavnog kompleksa, bazeni Kantrida. Kamere se nalaze na visini od 13,8 m iznad srednje razine mora (slika 3.), te zasebno nadziru istočni i zapadni dio plaže. Zahvaljujući svom položaju, zapadni dio plaže ima potpunu pokrivenost dok istočni dio ima djelomičnu zbog vegetacije i drveća. U ovom projektu koristi se Blackfly S GigE kamera (BFS-PGE-122S6C-C) s rezolucijom od 4,096 x 3,000 piksela, koja omogućava kontinuirane video snimke visoke rezolucije snimljene pri 4 Hz. Ono što razlikuje ovu metodu od ostalih su dvije važne stvari: 1) tzv. Timex snimke (slika 4.), primarni produkt Argus sustava koji omogućava osrednjavanje niza fotografija u 10-minutnom intervalu za pužanje bolje preglednosti svake brze pojave na obali kao što je uspinjanje vala (wave run-up), spuštanje vala (wave run-down) i zapljuskivanje vala (wave swash), kao i točniju preglednost pozicije obalne linije [7], i 2) korištenje geometrijskih tehnika [14] za transformiranje/rektifikaciju tzv. kosih slika u tlocrt obalnog područja, tako da se kvantitativne informacije mogu dobiti u stvarnim koordinatama [7]. Originalne slike tzv. "kose slike" su georektificirane prije nego su obalne linije izvučene. Zbog fiksnog položaja senzora, samo karakteristike leće (radijalna distorzija) i kontrolne točke tla su potrebne za georektifikaciju fotografije. Georektifikaciju možemo opisati kao transformaciju koordinata iz piksela (U,V) u svjetske koordinate (x,y,z). Šest kontrolnih točaka za zapadni dio plaže i četiri točke za istočni dio su postavljene od strane Geodetskog zavoda u Rijeci. Kontrolne točke se postavljaju na fiksnim dijelovima kao što su stepenice, pero, betonske ploče i sl., te su prikazane pomoću Hrvatskog terestičkog referentnog sustava HTRS96 (EPSG:3765) u horizontalnoj ravnini i HRVS71 u vertikalnom smjeru. U poglavlju 3. prikazan je položaj kontrolnih točaka na zapadnom dijelu plaže.

CoastSnap softverski paket, razvijen u okviru rada [15], koristi se za iscrtavanje obalnih linija sa zadovoljavajućih snimaka video nadzora. Od ukupnog broja snimaka koji se koriste za detekciju položaja obalne linije, iskoristive su samo snimke pri dnevnom svijetlu, bez odsjaja i sjena od sunca na površini mora [15].

Za potrebe softverskog paketa duž istočnog i zapadnog dijela obale položeno je niz presjeka okomito na obalu na razmaku od 2 m koji služe za određivanje položaja obalne linije (slika 5.). Sjecišta između dobivenih obalnih linija i niza postavljenih presjeka koriste se za buduće potrebe izračuna prosječne širine, površine i nagiba plaže.



**Slika 3. Položaj sustava video nadzora na rubu sportsko-rekreacijskog kompleksa bazeni Kantrida, dvije kamere koje zasebno nadziru istočni i zapadni dio plaže**



**Slika 4. Primjer 10-minutne timex fotografije, 28.12.2021. 15:50-16:00 h; prikazana je zona zapljusivanja za valove značajne valne visine od 2,3 m**



### 3 Rezultati

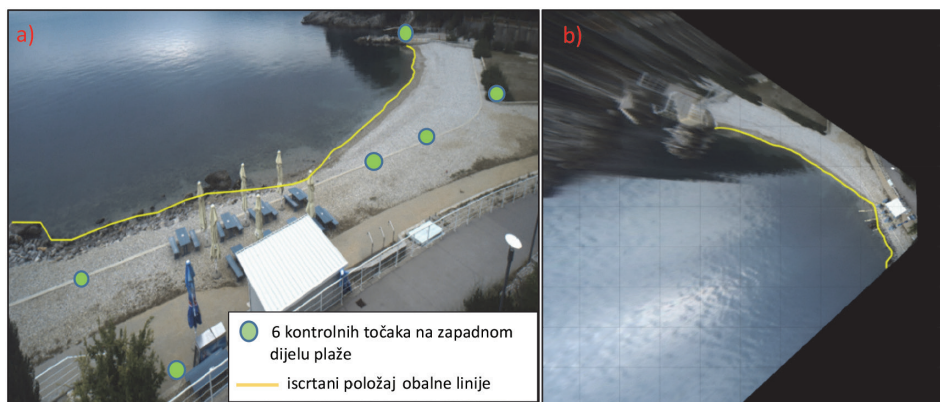
Softverski paket CoastSnap u programskom jeziku Matlab omogućio je poluautomatsko iscrtavanje položaja obalnih linija iz ortorektificiranih snimaka (slika 6.). Pogreška srednjeg kvadrata za rektifikaciju slike iznosila je 3,80 piksela, što odgovara udaljenosti od 8,5 cm na tlu. Postoje brojni pristupi za identifikaciju obalne linije kao što su grupiranje piksela na temelju nijanse i intenziteta [2], divergencija u RGB (engl. *Red-Green-Blue*) modelu boja [16], tehnike strojnog učenja i ostale. U dosadašnjim istraživanjima uspoređeni su različiti algoritmi za što točniju detekciju obalne linije i zaključeno je da se svaka od navedenih metoda najbolje ponaša u uvjetima okoliša u kojima je i razvijena [15].

Metoda detekcije obalne linije plaže Alimini u Italiji [1] temelji se na izoliranju piksela s vrijednostima unutar unaprijed postavljene tolerancije. To znači da se prvo odabere područje od interesa u kojem će se nalaziti i obalna linija, te se unutar tog područja označe točke koje predstavljaju kopno odnosno more. Takva metoda umanjuje trajanje sveukupnog procesa jer se svaka naknadna operacija vrši na području od interesa, a ne na cijeloj fotografiji. Ukoliko rezultati nisu zadovoljavajući, raspon boje sličnosti piksela se može izmijeniti ili se mogu odabrati druge točke i uključiti zone koje su prethodno bile zanemarene [8].

Za razliku od opisane metode na plaži Alimini u Italiji, u ovom radu položaj obalne linije temelji se na RGB modelu boja, tj. razlici crvenog i plavog kanala boja. Testiranjem je utvrđeno da takva dva kanala boja daju najizraženiji kontrast pri razlikovanju površine mora i kopna [15]. Pomoću procesa detekcije obalne linije koji je detaljno opisan u [15], prepoznavanje "mokrih" i "suhih" piksela olakšava određivanje položaja obalne linije. Ukoliko rezultati nisu zadovoljavajući, ručnom korekcijom može se riješiti tipičan problem ljetnih snimaka kada prisutnost turista, suncobrana i sl. može otežati točnost korištene metode [8]. Za prikaz detektiranih položaja obalnih linija u ovom radu provedeno je istraživanje od 30. rujna 2020. do 27. ožujka 2021., budući da u zimskom periodu dolazi do većeg broja razornih valova uzrokovanih olujama koji omogućavaju uočljivije promjene položaja obalne linije. Detektirani položaj obalne linije se također može ubaciti u AutoCAD/GIS softverski paket za preklapanje s dostupnom kartografijom [8]. Izvučeno je ukupno 135 fotografija istočne i zapadne obale iz video nadzornog sustava, te su obalne linije prikazane u softverskom paketu AutoCAD za lakšu vizualizaciju promjenjivosti položaja obale tijekom vremena (slika 5.). Takav prikaz olakšava uočavanje najvećih promjena obalne linije u odnosu na početni položaj bez ikakvih terenskih mjerenja, te točan izračun promjene širine/površine plaže kao jednog od najvažnijih parametara za prikaz intenziteta erozijskih procesa i potreba za dohranjivanjem.



Slika 5. Okomito položeni presjeci uzduž obale za procjenu položaja obalne linije (crvene linije) i položaj obalnih linija u promatranom razdoblju prikazane u AutoCad-u (crne linije)



Slika 6. Primjer procesa georektifikacije fotografije dobivene pomoću video sustava: a) "Kosa" slika umjetne šljunčane plaže Ploče, sa 6 kontrolnih točaka tla (GCP); b) ista slika georektificirana u referentne koordinate  $(x,y,z)$

## 4 Zaključak

S obzirom da djelovanje valova uzrokuje morfološku aktivnost u obliku erozije i sedimentacije (akumulacije) nasipnog materijala [7], kontinuirano proučavanje i procjena obalnog stanja imaju temeljnu ulogu [17]. Uloga Argus video nadzornog sustava je omogućiti jeftin i pristupačan sustav za dugotrajno praćenje ponašanja plaže pri različitim prirodnim i antropogenim [7] promjenama. U ovom radu predstavljen je obalni video sustav na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče u Rijeci koji pruža mogućnost automatiziranog prikupljanja podataka, obuhvaćajući mnogo veći vremenski i

prostorni raspon nego što je to prije bilo moguće. Uz tzv. timex snimke koje s bijelim "trakama" uzduž obale jasno označavaju lokaciju loma vala, te pokazuju točniju poziciju obalne linije, ova metoda omogućava i nadgledanje obale i prilikom loših vremenskih uvjeta što je s drugim metodama teško postići. Iscrtavanjem različitih položaja obalnih linija iz ortorektificiranih slika određuju se promjene širine plaže, odnosno ukupna promjena površine plaže uzrokovana pronosom materijala u poprečnom smjeru. Kako bi se postigao veći potencijal rekreacijskih usluga na samoj plaži, često se prirodna obalna linija dodatno nasipava šljunčanim materijalom [16]. Usporedbom višemjesečnih promjena položaja obalne linije može se računski i vizualno na slici zaključiti u kojim dijelovima plaže dolazi do najvećih promjena te tako s obzirom na visoku cijenu dohrane plaže olakšati odabir pozicije nasipavanja materijala bez ikakvih terenskih mjerenja. Jedan od glavnih ciljeva BEACHEX projekta je minimizirati gubitke materijala žala uzrokovane erozijom tijekom nepovoljnih klimatskih utjecaja najčešće u zimskim olujnim mjesecima, te se ovakva metoda ispostavila izrazito učinkovitom. Jednostavnost i robusnost prikupljanja slika, te velika količina informacija u vremenskom razdoblju u danima, tjednima i mjesecima, kao i prostornom rasponu u metrima i kilometrima učinile su Argus sustav vrlo uspješnim alatom za nadziranje promjena na obali.

Kroz daljnje istraživanje planirano je poboljšanje točnosti procjene položaja obalne linije korištenjem konvolucijskih neuronskih mreža. Digitalnom analizom slike, tj. treniranjem neuronskih mreža za razlikovanje kopna i mora, doprinijelo bi se značajnijem smanjivanju vremena detekcije položaja obalne linije i poboljšanju trenutnog načina iscrtavanja koji zahtjeva i ručne korekcije.

## Literatura

- [1] Damiani L., Mossa M.: A video-based technique for shoreline monitoring in Alimini (LE), 2<sup>nd</sup> International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection: Coastlab'08, Bari, Italy, pp. 153-156, 2008.
- [2] Aarninkhof S.G.J., Turner I.L., Dronkers T.D.T., Caljouw M., Nipius L.: A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry, *Coastal Engineering* 49 (2003) 4, pp. 275–289.
- [3] Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W.: *Remote sensing and image interpretation*, Hoboken NJ 07030, USA: John Wiley and Son, 2004.
- [4] Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N.: Coastline change detection using remote sensing, *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 4 (2007) 1, pp. 61-66.
- [5] Kroon A.: Application of remote sensing video systems to coastline management problems, *Coastal Engineering* 54 (2007) 6-7, pp. 493–505.



- [6] Plant N. G., Aarninkhof S.G., Turner I.L., Kingstont K.S.: The Performance of Shoreline Detection Models Applied to Video Imagery, *Journal of Coastal Research* 1 (2007) 3, pp. 658–670.
- [7] Harley M. D., Andriolo U., Armaroli C., Ciavola P.: Shoreline rotation and response to nourishment of a gravel embayed beach using a low-cost video monitoring technique: San Michele-Sassi Neri, Central Italy, *Journal of Coastal Conservation* 18 (2014) 5, pp. 551–565.
- [8] Gianluca M., Valentini N., Damiani L.: Coastal Video Monitoring system: results and perspectives, 1<sup>st</sup> Workshop on the state of the art and challenges of research efforts at POLIBA Bari, Italy, pp. 509-513, 2014.
- [9] Holman R. A., Stanley J.: The history and technical capabilities of Argus, *Coastal Engineering* 54 (2007) 6-7, pp. 477–491.
- [10] Kalinić F., Lončar G.: Morfodinamika i održivost nasipane šljunčane plaže - the example of Ploče beach in Rijeka, 6. Simpozij doktorskog studija građevinarstva: Zbornik radova, Zagreb, Hrvatska, pp. 85–96, 2020.
- [11] Bogovac T., Carević D., Bujak D., Ilić S., Vukovac M.: Održivost dohranjivanja plaza u Hrvatskoj, 8. Sabor hrvatskih graditelja, Vodice, pp. 1-10, 2021.
- [12] Tabain T.: Standard wind wave spectrum for the Adriatic Sea revisited, *Brodogradnja* 45 (1997), pp. 303–313.
- [13] DGU Geoportal Available online: <https://geoportal.dgu.hr/>
- [14] Holland K.T., Holman R.A., Lippmann T.C., Stanley J., Plant N.: Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 22 (1997) 1, pp. 81-91.
- [15] Harley M.D., Kinsela M.A., Sánchez-García E., Vos K.: Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images, *Coastal Engineering* 150 (2019), pp. 175–189.
- [16] Turner I. L., Harley M.D., Short A.D., Simmons J.A., Bracs M.A., Philips M.S., Splinter K.D.: A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia, *Scientific Data* 3 (2016):160024, pp. 1-13.
- [17] Valentini N., Damiani L., Molfetta M. G., Saponieri A.: New coastal video-monitoring system achievement and development, *Proceedings of 35<sup>th</sup> Conference on Coastal Engineering*, Antalya, Turkey, pp. 11-21, 2016

# A research review on aluminium beam-to-column joints

**Anđelo Valčić<sup>1</sup>**, Prof. **Davor Skejić<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, andelo.valcic@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, davor.skejic@grad.unizg.hr

## Abstract

With the upcoming release of the second generation of European standards for the design of aluminium structures (Eurocode 9), significant changes in design guidelines are on horizon. The design of aluminium joints is a major component of the improvements and novelties that will be presented in the new generation of this standard. Therefore, this paper provides an up-to-date research overview on aluminium structural joints focusing on beam-to-column joints as well as identifying knowledge gaps and opportunities in this research field.

*Key words: aluminium, beam-to-column joint, HAZ, welding, mechanical joining, component method, adhesives*

## Pregled istraživanja aluminijskih priključaka nosač-stup

### Sažetak

S nadolazećim izdanjem druge generacije europskih normi za projektiranje aluminijskih konstrukcija (Eurocode 9), na pomolu su značajne promjene u smjernicama za projektiranje. Projektiranje aluminijskih priključaka ključna je komponenta poboljšanja i noviteta koji će biti predstavljeni u novoj generaciji ove norme. Stoga ovaj rad donosi najnoviji pregled istraživanja aluminijskih konstrukcijskih priključaka s fokusom na priključke nosač-stup, kao i utvrđivanje nedostataka u znanju i prilika u ovom području istraživanja.

*Ključne riječi: aluminij, priključak nosač-stup, ZUT, zavarivanje, mehaničko spajanje, metoda komponenata, ljepila*

## 1 Introduction

Aluminium in its pure form is a low strength metal and as such is not suitable for the requirements of the modern construction industry. However, in combination with alloying elements such as manganese, magnesium, silicon, etc., aluminium is successfully used in the form of alloys. With their main favourable properties, high strength-to-weight ratio and pronounced corrosion resistance, aluminium alloys have great potential for use in primary load-bearing structures, especially in marine environments [1, 2]. Another factor in favour of aluminium alloys is the manufacturing process and recycling ability. Namely, the extrusion process allows the production of profiles from a variety of cross-sectional shapes [3] which cannot be produced from steel, concrete, timber, or plastic. Moreover, the possibilities of recycling aluminium are endless. Secondary production of aluminium (recycled aluminium) consumes much less energy (up to 20 times) [2] than primary production of aluminium, which is a big step towards carbon neutrality by 2050 [4] from a sustainability point of view. Considering these properties, aluminium alloys can certainly be considered as one of the key engineering materials today [5].

Among other design rules, the standard for the design of aluminium structures, EN 1999-1-1 [6], contains rules for the design of aluminium connections/joints. In the design of welded structural members and joints using hardened or artificially aged alloys, due consideration must be given to the reduction of mechanical properties that occurs in the vicinity of the welds, i.e., in the heat-affected zone (HAZ) [7]. According to EN 1999-1-1 [6] and [8], the local reduction of the mechanical properties of the base material due to welding can be up to 50% for 6xxx series aluminium alloys, whose mechanical properties are most suitable for use in structural engineering. On the contrary, several recent studies [9, 10] have shown that these reductions can be decreased by applying advanced welding techniques from the field of mechanical engineering in combination with insight into the actual stress distribution after welding. Such novel welding techniques open a space for the development of reliable, as well as economically and environmentally viable welded aluminium structures and joints.

In the current European standard for the design of aluminium structures EN 1999-1-1 [6], the design of aluminium beam-to-column joints is based on the component method. However, the component method, which is widely known and used for the design of steel joints, is not fully applicable to aluminium structures [11, 12]. There are several reasons for this, the most notable of which are: the influence of welding, which has not yet been adequately researched; the lack of research into the stiffness of the individual components of the joint, which can contribute to the overall stiffness of the joint; and, no less importantly, the justification for using typical extruded I-sections in the frame systems. The latter reason arises from the fact

that the serviceability limit state criterion is very often relevant for the design of aluminium structures. Therefore, the logical choice, especially for the beam segment, is the use of lattice girders or special welded I-sections.

Nowadays, the use of adhesive bonded joints has been growing rapidly in various industries due to numerous advantages over traditional joining techniques (more uniform stress distribution, ease of production, the possibility of joining different materials, stability of the mechanical properties of the base material) [13, 14]. Consequently, adhesives hold higher potential for application in structural joints, especially in beam-to-column joints, but also open a whole range of unknowns - from the design their self to their durability.

However, for the mentioned innovative welded and bonded aluminium joints there are no normative design rules and thus it is not possible to assess their reliability. The second generation of the European standard for the design of aluminium structures prEN 1999-1-1:2021 [15] brings improved analytical expressions for bolted and riveted connections. It also brings changes related to the T-stub and the effective lengths of the column flange in bending. Other new features attracting attention include the introduction of a new type of connection - the bolt-channel joint, and the design of friction stir welds. In addition to the T-stub, two new components for the design of beam-to-column joints are included (column web in transverse tension and column web in transverse compression). Nonetheless, the introduced improvements are not yet sufficient for the component method to be reliably used for aluminium beam-to-column joints. For adhesive bonded joints reference is made to the manufacturer's specifications or the informative Annex P [15], where the connection must be designed in a way that only shear forces need to be transmitted and appropriate adhesives applied.

Since the standardized methods for the design of aluminium joints are not evaluated probabilistically, the question of the actual reliability level of such designed aluminium structures remains open. Therefore, the purpose of this paper is to provide an overall review of previous research on the behaviour of aluminium structural joints and their components, with a focus on beam-to-column joints.

## **2 Component method for aluminium beam-to-column joints**

In everyday design practice, it is common to consider the joints between structural members as either fully rigid or pinned. Such an approach usually leads to inefficient structures [16]. Pinned joints, Figure 1.a, have no rotational stiffness, so they cannot transmit bending moment, although they do transmit axial and shear force.

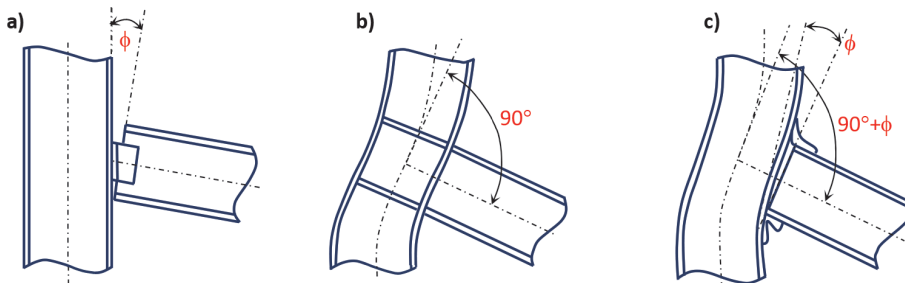


Figure 1. Joint types according to their behaviour: a) pinned, b) rigid, c) semi-rigid

Rigid joints, on the other hand, have rotational stiffness, and therefore can, transmit all types of loads, Figure 1.b. In reality, joints have a finite degree of rotational stiffness resulting from the deformability of all components from which the joints are composed, Figure 1.c. These types of joints are referred to as semi-rigid. Experimental research and the development of numerical methods have spurred the expansion of ideas for a more realistic classification of joints for everyday engineering practice. Hence, the complex behaviour of metal joints is effectively characterised by the component method, which is extensively investigated for steel joints [17]. The component method and the mechanical models describing each type of joint defines the basic characteristics of the joints. These characteristics are stiffness, bending resistance and rotation capacity. This method fits very well with the simplified mechanical model consisting of springs and rigid links, Figure 2. The essence of the component method refers to the characterisation of the load-displacement ( $F-\Delta$ ) curve for each spring. For the evaluation of the initial stiffness of the joint, only the linear stiffness of each component is required. However, for the assessment of the component’s ductility, the knowledge of the nonlinear  $F-\Delta$  response is necessary.

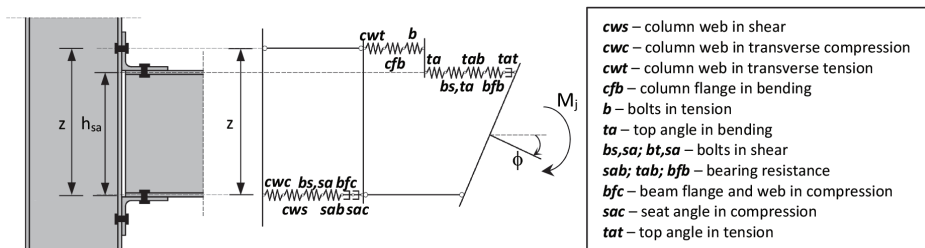


Figure 2. Schematization of the component method for beam-to-column joint with flange cleats [18]

A very few research is conducted regarding the components of which the most basic types of aluminium beam-to-column joints are constituted, not to mention that they are not probabilistically evaluated. It is also worth noting that there have been no experimental studies on the behaviour of welded beam-to-column joints in full-scale so far. All relevant studies are based on specific components of welded and bolted joints, mostly on a T-stubs [19-23]. Some recommendations for future research regarding the component method and aluminium joints are proposed by De Matteis et al. in [12].

For recalibration of the component method from steel to aluminium joints, the basic components of the aluminium joints need to be further investigated, as most of their design rules have been taken from EC3 [17] without detailed laboratory tests or numerical simulations. In general, experimental studies on full-scale welded and bolted beam-to-column joints must be conducted to obtain real  $M-\phi$  curves and to recalibrate component method from steel to aluminium structural joints. Moreover, further studies are required to consider that, unlike steel, aluminium alloys exhibit nonlinear behaviour even at low deformations and have limited ductility, which affects the fracture strength of the joint [24].

### **3 Basic components of beam-to-column joints**

#### **3.1 General**

In aluminium alloys, thermal expansion is twice as high as in steel, and the drop in the mechanical properties of the material at elevated temperatures is much faster and higher. Therefore, during welding, a deterioration in mechanical properties occur in the heat-affected zone – the area of base material that is not melted but has its microstructure properties altered. To understand the effects of welding on the heat-affected zone of aluminium alloys, different types of aluminium alloys and the potential for strength changes after welding need to be fully investigated. HAZ problems exist within welded and majority of bolted beam-to-column joints. If welded structural elements are used instead of extruded members, the effects of welding in such members should also be considered.

In recent decades, only a circumscribed amount of research has been done related to welded aluminium joints. One of the first attempts to seek a systematic and comprehensive understanding of the behaviour of welded connections was carried out by Soetens [25] and Matusiak [26]. Both of them analysed the heat affected zone (HAZ) and its impact on the behaviour and strength of welded connections. Moreover, Chan and Porter Goff [27] experimentally investigated the effects of a reduced strength zone on cruciform welded connections in terms of failure modes, ductility, and load-bearing capacity. The results of this study indicate, among other

things, that weld defects can severely reduce the ultimate load bearing capacity of the mentioned connections. Another study on cruciform welded connections, as well as RHS welded T-joints was conducted by Zhang et al. [28]. The authors applied a new, holistic, modelling approach (thermal-mechanical analysis and mechanical analysis combined) to predict the fracture behaviour of aluminium welded joints. By using an interpolation function between two approaches, the HAZ dimensions of welded joints can be automatically determined from the weld microstructure data. Consequently, by implementing this approach in modern welding techniques (laser welding, friction-stir welding, etc.), fewer qualitative and quantitative reductions in HAZ can be achieved. Cheng et al. [10] have provided a comprehensive review of techniques that could improve the softening behaviour of aluminium joints. Several further studies regarding joint softening have been proposed in this paper as well. Early attempts of numerical investigations on aluminium welded beam-to-column joints were made by Wang et al. [29], who reproduced the laboratory tests done by Matusiak [26]. Since the numerical results were found to be highly mesh dependent, reliable results were obtained by applying non-local plastic thinning to the welds and HAZ. This technique was recommended by the authors for modelling thin-walled aluminium structures with shell finite elements. In addition, numerical studies were carried out on the equivalent welded T-stub model, adopted in current version of EC9 [6], which reflects the behaviour of some elements of the joint in tension and compression. De Matteis et al. [11] in their research have proposed a numerical model with detailed characterization of HAZ that accurately reproduces the behaviour of the T-stub compared to the experimental results and the design method ("K-method") included in EC9 [6, 15]. More studies to evaluate the HAZ properties were carried out on aluminium T-section members with and without transverse welds as well as on stiffened aluminium panels [30, 31]. Both studies showed significant reduction on mechanical properties of the base material, although it was observed in [30] that it was highly influenced on weld location. However, further studies on HAZ and welded joints need to be carried out so that characterisation of these components can be reliably and less conservatively used with the component method. In the continuation of this chapter, only the components of aluminium joints that have been subject of research so far will be presented.

### **3.2 Equivalent T-stub in tension**

The most significant research related to bolted beam-to-column joints was conducted by De Matteis et al. [32] over two decades ago. This numerical study was based on aluminium T-stub joints where influence of behavioural parameters such as strain hardening effect, influence of HAZ and low ductility were analysed. Since this was the first extensive and comprehensive investigation of an aluminium T-stub

component, the results of this numerical study were the basis for the evaluation of T-stub's resistance in the current EC9 standard [6]. It has been shown that the failure mechanisms of aluminium T-stubs differ from those made of steel, Figure 3(a). Furthermore, the aforementioned study proved that the equations used in EC3 [17] for steel T-stubs are quite accurate for aluminium T-stubs only when strain hardening is negligible. The assessment of the plastic resistance of the T-stub is based on the well-known principle of yield lines. Experimental and numerical studies on yield lines were carried out by Efthymiou [33]. For the type 1 mechanism, Figure 3.a, two basic yield lines were developed: at the flange-to-web junction and along the bolt axis, Figure 3.b. Other relevant numerical research on aluminium bolted T-stubs can be found in [34-37].

Recent experimental studies involved T-stub components connected by swage-locking pins under monotonic loading [38]. In this study, 30 specimens were tested which included failure modes, load-carrying, and deformation capacity as well as F- $\Delta$  response. Compared to the experimental results, the EC9 design rules for predicting the bolted T-stub's resistance were found to be conservative. The authors took their study a step further and suggested improvements using the Continuous Strength Method (CSM). The continuation of this experimental study was followed by extensive parametric numerical analysis [39]. The objective of this study was to validate the finite element (FE) model based on the experimental tests in [38] and provide a parametric study that included the preload effect in the swage-locking pins, the pin diameter, etc. Based on this study, a new method was proposed to predict the location and distance more accurately between the plastic hinges compared to the existing method in the EC9 standard for bolted T-stub.

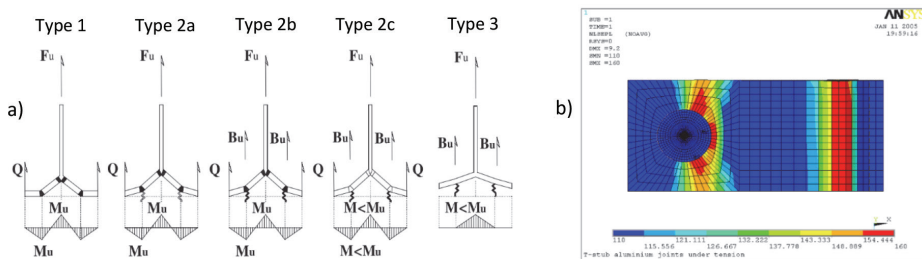


Figure 3. Aluminium bolted T-stub: a) Failure mechanisms [32], b) Typical yielding lines (zones) [33]

Wang et al. [40] investigated five full-scale aluminium top and seat angle cleats (TSAC) joints and three full-scale aluminium top, seat, and web angle cleats (TSWAC) joints connected by swage-locking pins, Figure 4. It should be noted that two different materials were used for the angle cleats: aluminium alloy AW 6061-T6 and stainless steel S304. The study found higher initial rotational stiffness and bending resistance when stainless steel cleats were used. In addition, the TSWAC joints



proved to be more resilient than the TSAC joints. The authors pointed out that there were some unavoidable uncertainties since only one specimen of each configuration (8 configurations in total) was tested and no repeated tests were performed.

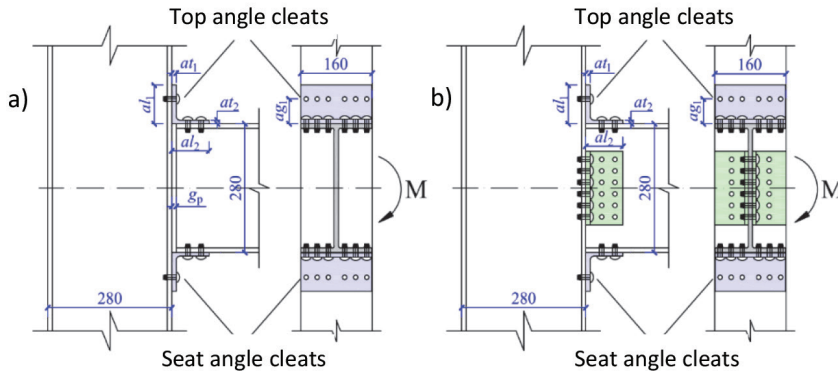


Figure 4. Test specimens of swage-locking pinned joints with angle cleats: a) TSAC joint, b) TSWAC joint [40]

### 3.3 Column web in transverse tension

The column web component subjected to transverse tension was part of the research work done by De Matteis and Brando [24, 41]. The authors investigated the influence of the HAZ and column axial load on the overall component behaviour by means of a parametric numerical analysis. It was concluded that column axial load reduces the component strength by 80% for column in compression and 20% for column in tension. The authors proposed a correction factor  $k_{cwt}$  to account these adverse effects. The results of these research works will be implemented in the second generation of EC9 [15].

## 4 Innovative beam-to-column aluminium joints

Nowadays, the use of innovative modular structures is on the rise and represents a key strategy to meet the requirements from a sustainability perspective. The targeted synergy of modular construction and versatile material such as aluminium, has the potential to improve productivity, efficiency, and quality of construction. Pi Home [42] is one of the great examples of aluminium innovative modular structures, Figure 5.a. Special attention is paid to the joints in such structures. Figure 5.b shows the detail of the innovative beam-to-column joint with specially extruded aluminium profiles using screw grooves. Macillo et al. [43] investigated experimentally and numerically the pull-out behaviour of similar screw groove connections. A total of 45 laboratory tests were carried out with three different screw slot config-

urations. The numerical model developed in this study was the basis for the extensive parametric analysis that led to the analytical expressions soon to be published in second generation of EC9 [15] for these types of joints.

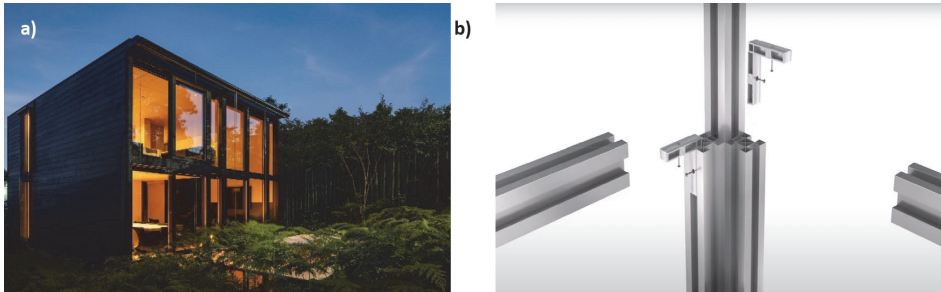


Figure 5. Pi Home: a) Modular aluminium structure, b) Innovative beam-to-column joint with screw grooves [42]

In the field of adhesive bonded joints, one of the industrially used joint types is the T-joint. Such joints are often found in the marine and aerospace industries [44]. However, most of the research relates to adhesive joint configurations like single-lap joints (SLJ) and double-lap joints (DLJ). The aluminium adhesively bonded T-joints, which are the subject of research in [14, 44, 45], indicate high ductility and resistance of such joints. Figure 6 therefore shows possible further research on the application of adhesives in aluminium beam-to-column joints proposed by the authors of this manuscript. Based on their preliminary numerical analyses, adhesives have potential to be used either in the form of strengthening the joints, Figure 6.a, or as a load-bearing component, Figure 6.b.

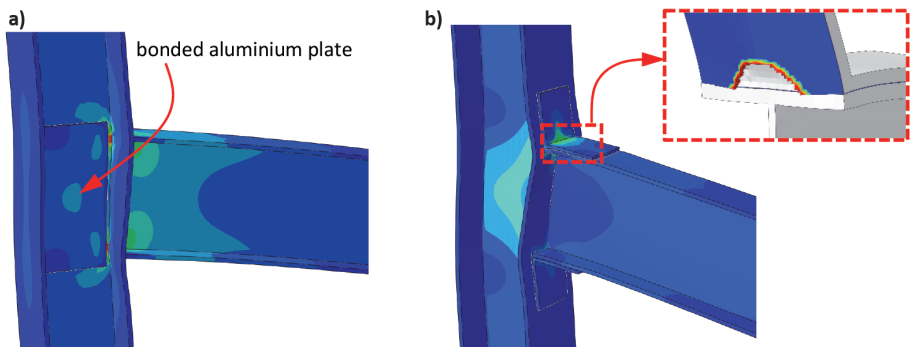


Figure 6. Aluminium beam-to-column joint: a) with bonded aluminium plate for strengthening column web, b) with bonded flange cleats

## 5 Conclusion

The design methods for characterisation of aluminium beam-to-column joint behaviour given in the current Eurocode 9 are slightly modified from Eurocode 3. The second generation of Eurocode 9 brings new analytical expressions for innovative connections and improvements related to the design of aluminium beam-to-column joints. Given insight into the research on aluminium connections/joints revealed a very small number of performed laboratory tests in general. Most research on welded joints are based on numerical simulations calibrated on laboratory tests conducted more than two decades ago. The problem of aluminium welding in terms of reduction in mechanical properties has not yet been sufficiently researched. However, the results of several recent studies on novel welding techniques are promising in terms of lower reductions of mechanical properties in the HAZ. Within this paper, the research on basic components of beam-to-column joints and current possibility of applying the component method to aluminium beam-to-column joints is briefly presented and discussed as well. Overall, laboratory tests and probabilistic evaluation of both welded and bolted beam-to-column joints in full-scale are essential for reliable recalibration of the component method from steel to aluminium joints. Nevertheless, there is an opportunity to develop innovative joining techniques (modern welding techniques, adhesive bonding, etc.) and to design reliable, economically, and environmentally viable structural aluminium joints and welded aluminium structures in general.

## Literature

- [1] Skejić, D., Boko, I., Torić, N.: Aluminium as a material for modern structures, GRAĐEVINAR 67 (2015) 11, pp. 1075-1085.
- [2] Georgantzia, E., Gkantou, M., Kamaris, G. S.: Aluminium alloys as a structural material: A review of research, Engineering Structures 227 (2021), 111372.
- [3] Mazzolani, F. M.: Aluminium Alloy Structures. 2nd Edition, Boca Raton: CRC Press, 1995.
- [4] Carbon neutrality EU, <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20190926STO62270/sto-je-ugljicna-neutralnost-i-kako-do-nje-doci-do-2050>
- [5] Aluminium Leader, [https://www.aluminiumleader.com/about\\_aluminium/what\\_is\\_aluminum/](https://www.aluminiumleader.com/about_aluminium/what_is_aluminum/)
- [6] European Committee for Standardization (CEN), Eurocode 9: Design of Aluminium Structures—Part 1-1: General structural rules (EN 1999-1-1:2007+A1:2009+A2:2013), CEN: Brussels, Belgium, 2007.

- [7] Boko, I., Skejić, D., Torić, N.: *Aluminijske konstrukcije*. Udžbenik Sveučilišta u Splitu i Zagrebu, Split, 2017.
- [8] Zhu, J. H., Young, B.: Aluminium alloy tubular columns – Part I: Finite element modeling and test verification, *Thin-Walled Structures* 44 (2006), pp. 961-968.
- [9] Nazemi, N., Ghrib, F.: Strength Characteristics of Heat-Affected Zones in Welded Aluminum Connections, *Journal of Engineering Mechanics* 145 (2019) 12.
- [10] Cheng, J., Song, G., Zhang, X., Liu, C., Liu, L.: Review of Techniques for Improvement of Softening Behavior of Age-Hardening Aluminum Alloy Welded Joints, *Materials* 14 (2021), 5804.
- [11] De Matteis, G., Brescia, M., Formisano, A., Mazzolani, F. M.: Behaviour of welded aluminium T-stub joints under monotonic loading, *Computers & Structures* 87 (2009) 15–16, pp. 990-1002.
- [12] De Matteis, G., Brando, G.: Analysis of Aluminium Beam-to-Column Joints by the Component Method: Existing Studies and Research Needs, *Key Engineering Materials* 710 (2016), pp. 409-414.
- [13] Tserpes, K., Barroso-Caro, A., Carraro, P. A., Beber, V. C., Floros, I., Gamon; W., Kozłowski, M., Santandrea, F., Shahverdi, M., Skejić, D., Bedon, C. & Rajčić, V.: A review on failure theories and simulation models for adhesive joints, *The Journal of Adhesion* 97 (2021) 10, pp. 1-62.
- [14] Moreira, F. J. P., Campilho, R. D. S. G., Cardoso, M. G., Silva, F. J. G.: Evaluation of T-joints in aluminium structures under different geometries, *Procedia Manufacturing* 51 (2020), pp. 848-855.
- [15] European Committee for Standardization (CEN), Eurocode 9: Design of Aluminium Structures—Part 1-1 General structural rules (prEN 1999-1-1); CEN: Brussels, Belgium, 2021.
- [16] Skejić, D., Jamaković, S.: Projektiranje ekonomičnih čeličnih okvirnih konstrukcija, *Elektronički časopis Građevinskog fakulteta Osijek – e-GFOS* 3 (2012) 4, pp. 1-13.
- [17] European Committee for Standardization (CEN), Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1–8: Design of joints; CEN: Brussels, Belgium, 2005.
- [18] Skejić, D.: Reliability assessment of beam-to-column joints with cleats, Ph.D. Thesis (in Croatian), Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, Zagreb, 2009.
- [19] De Matteis, G., Mandara, A., Mazzolani, F. M.: T-stub aluminium joints: influence of behavioural parameters, *Computers and Structures* 78 (2000), pp. 311-327.
- [20] Xu, H., Guo, X., Luo, Y.: The Load-Bearing Capacity of Aluminium Alloy T-stub Joints, *Advanced Materials Research* 261-263 (2011), pp. 765-769.

- [21] De Matteis, G., Naqash, M. T., Brando, G.: Effective length of aluminium T-stub connections by parametric analysis, *Engineering Structures* 41 (2012), pp. 548-561.
- [22] Naqash, M. T., Brando, G., De Matteis, G.: Calibration and Validation of Numerical Models through Experimental Tests, *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering* 3 (2014) 2.
- [23] Maljaars, J., De Matteis, G.: Structural Response of Aluminium T-Stub Connections at Elevated Temperatures and Fire, *Key Engineering Materials* 710 (2016), pp. 127-136.
- [24] De Matteis, G., Sarracco G., Brando, G., Mazzolani, F. M.: Influence of Column Axial Load and Heat Affected Zone on the Strength of Aluminium Column Web in Tension, *Materials* (2014) 7, pp. 3557-3567.
- [25] Soetens, F.: Welded connections in aluminium alloy structures, *Heron* 32 (1987) 1.
- [26] Matusiak, M.: Strength and ductility of welded structures in aluminium alloys, Ph.D. Thesis, Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 1999.
- [27] Chan, T., Porter Goff, R.: Welded aluminium alloy connections: test results and BS 8118, *Thin-Walled Structures* 36 (2000) 4, pp. 265-287.
- [28] Zhang, Z. L., Odegard, J., Myhr, O. R., Fjaer, H.: From microstructure to deformation and fracture behaviour of aluminium welded joints – a holistic modelling approach, *Computational Materials Science* 21 (2001), pp. 429-435.
- [29] Wang, T., Hopperstad, O. S., Lademo, O.-G., Larsen, P. K.: Finite element analysis of welded beam-to-column joints in aluminium alloy EN AW 6082 T6, *Finite Elements in Analysis and Design* 44 (2007), pp. 1-16.
- [30] Edlund, S.: Buckling of T-Section Beam-Columns in Aluminium with or without Transverse Welds, Ph.D. Thesis, KTH, Stockholm, 2000.
- [31] Zha, Y.; Moan, T.: Ultimate strength of stiffened aluminium panels with predominantly torsional failure modes, *Thin-Walled Structures* 39 (2001) 8, pp. 631-648.
- [32] De Matteis, G., Mandara, A., Mazzolani, F. M.: T-stub aluminium joints: influence of behavioural parameters, *Computers and Structures* 78 (2000), pp. 311-327.
- [33] Efthymiou, E.: Numerical and Experimental Investigation of a Reference Aluminium Bolted Joint, *Jordan Journal of Civil Engineering* 2 (2008) 4.
- [34] Xu, H., Guo, X., Luo, Y.: The Load-Bearing Capacity of Aluminium Alloy T-stub Joints, *Advanced Materials Research* 261-263 (2011), pp. 765-769.
- [35] De Matteis, G., Naqash, M. T., Brando, G.: Effective length of aluminium T-stub connections by parametric analysis, *Engineering Structures* 41 (2012), pp. 548-561.

- [36] Naqash, M. T., Brando, G., De Matteis, G.: Calibration and Validation of Numerical Models through Experimental Tests, *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering* 3 (2014) 2.
- [37] Maljaars, J., De Matteis, G.: Structural Response of Aluminium T-Stub Connections at Elevated Temperatures and Fire, *Key Engineering Materials* 710 (2016), pp. 127-136.
- [38] Wang, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Gardner, L., Ouyang, Y.: Experimental investigation and design of extruded aluminium alloy T-stubs connected by swage-locking pins, *Engineering Structures* 200 (2019), 109675.
- [39] Wang, Z., Wang, Y., Yun, X., Zhang, Y., Li, Z., Wang, Z.: Numerical modelling of extruded aluminium alloy T-stubs connected by swage-locking pins: FE validation and parametric study, *Thin-Walled Structures* 155 (2020), 106926.
- [40] Wang, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Wang, Z., Ouyang, Y.: Experimental investigation on the behaviour of aluminium alloy beam-to-column joints connected by swage-locking pins, *Engineering Structures* 213 (2020), 110578.
- [41] Brando, G., Sarracco, G., De Matteis, G.: Strength of an Aluminium Column Web in Tension, *Journal of Structural Engineering* 141 (2015) 7.
- [42] Pi Home, <https://archello.com/project/pi-home>
- [43] Macillo, V., Fiorino, L., Mazzolani, F. M.: Pull-out behaviour of aluminium screw port joints: experimental and numerical investigation, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering* 7 (2014) 4, pp. 281-296.
- [44] Carneiro, M. A. S., Campilho, R. D. S. G.: Analysis of adhesively-bonded T-joints by experimentation and cohesive zone models, *Journal of Adhesion Science and Technology* 31 (2017) 18, pp. 1998-2014.
- [45] De Almeida, F. J. S., Campilho, R. D. S. G., Silva, F. J. G.: Strength prediction of T-peel joints by a hybrid spot-welding/adhesive bonding technique, *The Journal of Adhesion* 94 (2018) 3, pp. 181-198.



## Analiza otpornosti na savijanje LWT-FLOOR sustava

**Andrea Rajić<sup>1</sup>**, doc. dr. sc. **Ivan Lukačević<sup>2</sup>**

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

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

### Sažetak

Primjena spregnutih konstrukcija čelik-beton ima velike prednosti kao što su upotreba montažnih elemenata i svladavanje velikih raspona, te optimalna iskoristivost čelika i betona što se posebno očituje uporabom hladno oblikovanih čeličnih profila. Rad predstavlja numeričku parametarsku analizu inovativne spregnute međukatne konstrukcije sastavljene od hladno oblikovanih čeličnih profila i betonske ploče. Način spajanja čeličnih elemenata te stupanj posmične veze pokazali su znatan utjecaj na ponašanje spregnutog sustava LWT-FLOOR dok debljina valovitoga lima kao hrpta, broj zavora u poprečnom presjeku te razmatrane visine čeličnog presjeka nemaju značaj utjecaj za analizirani sustav.

*Ključne riječi: spregnuti sustav čelik-beton, sastavljeni hladno – oblikovani čelični elementi, točkasto zavarivanje, posmična veza, parametarska analiza metodom konačnih elemenata*

## Analyses of LWT-FLOOR system bending resistance

### Abstract

Application of composite structural systems have many benefits, such as a prefabrication and long span capability, but also the optimal utilisation of structural steel and concrete which is given particularly by implementation of cold-formed steel (CFS) elements. This paper presents numerical parametric analysis on an innovative solution of a composite floor structure system consisting of built-up CFS elements and slabs. Type of connection between CFS elements and the degree of shear connection had the most significant impact on LWT-FLOOR system behaviour, while the corrugated web thickness, spot weld density and considered steel beam heights had less influence on the analysed composite system behaviour.

*Key words: composite steel-concrete system, built-up cold-formed steel elements, spot welding, shear connection, parametric FE analyses*



## 1 Uvod

Spregnuti sustavi čelik-beton su jedni od najisplativijih konstrukcijskih sustava primijenjeni u gradnji višekratnih građevina. Njihov razvoj rezultirao je poželjnim i ekološki prihvatljivim međukatnim sustavima (konstrukcijska učinkovitost, brzina građenja, demontaža te ponovna upotreba) te koji omogućava arhitektonsku slobodu u oblikovanju, malu debljinu betonske ploče, lako prilagođavanje nepravilnoj geometriji, mogućnost smanjenja vlastite težine, itd. Ahmed i Tsavdaridis [1] predstavili su detaljan pregled razvoja spregnutih sustava čelik-beton čiji su glavni ciljevi istraživanja povezani su s inovativnim metodama izgradnje i novim konstrukcijskim proizvodima. Međutim, unatoč opsežnim istraživanjima hladno oblikovanih čeličnih (cold formed steel, CFS) profila, spregnuti sustav formiran od CFS profila još uvijek nije u praktičnoj primjeni, iako ideja postoji već desetljećima [2]. Pregled primjene CFS profila u spregnutim sustavima s različitim tipom posmične veze može se pronaći u članku [3]. Hanaour [2] je bio među prvima koji je istraživao ponašanje spregnutih nosača izvedenih s CFS profilom s različitim tipovima posmične veze. Lakkavalli i Liu [4] proveli su istraživanje spregnutih ploča koje su sastavljene od CFS C profila i betona kako bi istražili ponašanje te procijenili učinkovitost prijenosa posmičnih sila. Hsu i dr. [5] predložili su novi spregnuti sustav nosača sastavljen od armirane betonske ploče izvedene na valovitom limu, CFS sastavljenih profila i moždanika izvedenih od hladno oblikovanog profila poprečnog presjeka oblika šešira. U člancima [6, 7] autori su razmatrali ponašanje spregnutih nosača sastavljenih od CFS i fero-cementne ploče vezanih vijčanim tipom posmične veze. Pokazano je da se otkazivanje događa zbog drobljenja betona u slučaju debljih čeličnih profila, dok se otkazivanje u slučaju tanjih profila događa zbog njihovog izbočivanja. Khadavi i Tahir [8] su proveli istraživanje poboljšanja ponašanja spregnutih nosača formiranih od zatvorenih čeličnih profila ispunjenih betonom u savijanju. Uporaba takvih profila može poboljšati otpornost na savijanje jer beton smanjuje lokalno izbočivanje čeličnog profila. Leal i Batista [9,10] istraživali su ponašanje spregnute međukatne konstrukcije formirane od CFS rešetke i djelomično predgotovljene betonske ploče koje su međusobno povezane inovativnim sredstvima za sprezanje. Pokazali su kako istražena sredstva za sprezanje mogu omogućiti potpunu vezu i prihvatljivu posmičnu otpornost. Lagani međukatni sustav obrađen u članku [11] sastoji se od rešetke formirane od U profila koji formiraju donju pojasnicu, te C profila koji formiraju hrbat i gornju pojasnicu. U svrhu poboljšanja pojedinih dijelova spregnutog sustava čelik-beton koriste se poprečni presjeci i materijali koji su prilagodljiviji sustavu, dok je posmična veza, koja osigurava vezu između pojedinih elemenata, drugi ključni parametar koji uvelike utječe na ponašanje spregnutog sustava. Još jedno istraživanje koje je povezano s inovativnom posmičnom vezom je članak koji analizira ponašanja na savijanje djelomično obloženo hladno oblikovanog spreg-

nutog nosača koristeći armaturu kao sredstvo za sprezanje [12]. Još nekoliko tipova sredstava za sprezanje predstavili su Elsawaf i Bamaga [13] te Hsu i dr [5]. Kako bi se omogućila demontaža spregnutog sustava, u literaturi [14-17] su analizirana demontažna sredstva za sprezanje. Adil Dar i dr. [18] predstavili su usporedbu različitih sredstava za sprezanje u kombinaciji s profiliranim limom u spregnutoj ploči. Shirgaokar [19] je istražio sličnu ideju. Osim utjecaja posmične veze, veliki utjecaj na spregnuti sustav ima i način povezivanja CFS profila u sastavljenom čeličnom nosaču [20]. Glavne prednosti sastavljenih čeličnih CFS nosača s valovitim hrptom (corrugated web, CW) su povećanje otpornosti nosača na lokalno i torzijsko izbočivanje te sprječavanje lokalnog sloma hrpta pri djelovanju koncentriranih sila [21-23] te su sažeta i prikazana kroz istraživanja na nosačima s vijcima [21, 22, 24], točkastim zavarima (spot welds, SW) i tehnike hladnog prijenosa metala (cold metal transfer, CMT) [25-27]. S obzirom da ovakva tehnička rješenja omogućuju standardizaciju oblikovanja detalja i predgotovljenosti, i SW i CMT tehnike zavarivanja su prikladne u automatiziranoj proizvodnji. Numerička parametarska istraživanja su kalibrirana i potvrđena eksperimentalnim ispitivanjima uzimajući u obzir i otvore u hrptu te su rezultati objavljeni u nekolicini radova [26,28-30]. Istraživanja potvrđuju odlično ponašanje sastavljenih nosača izvedenih od CW spojenih SW. Ovaj rad predstavlja parametarsku FE analizu inovativnog rješenja međukatnog sustava. LWT-FLOOR sustav se sastoji od sastavljenog CFS nosača s CW spojenog SW i betonske ploče izvedene na profiliranom limu.

## 2 Numerički i analitički modeli

### 2.1 Numerički modeli

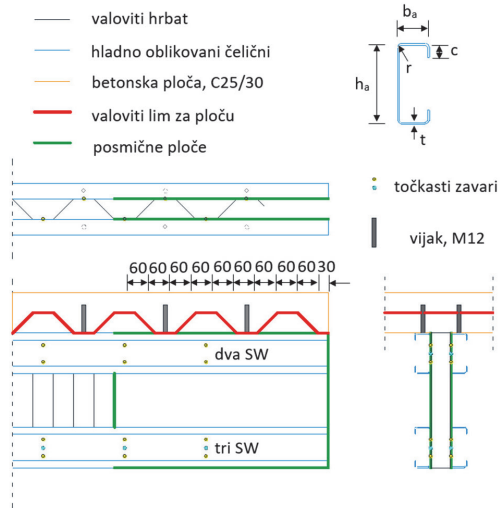
Numerički modeli pripremljeni su u računalnom programu Abaqus/CAE 2021 [31] kao jednostavno oslonjeni nosači dužine 6 m oblikovani prema geometriji danoj u tablici 1 i na slici 1. Opterećenje je zadano preko pomaka u sredini raspona čija konačna vrijednost iznosi 100 mm. S obzirom na visoki stupanj nelinearnosti u modelu (materijalne, geometrijske, SW spojevi i posmične veze), provedena je eksplicitna dinamička analiza [3].

Svojstva betona definirana su modelom plastičnog oštećenja betona (concrete damage plasticity, CDP) kako je objašnjeno u članku [32], dok su svojstva čeličnih elemenata i vijaka definirana bilinearnim elastoplastičnim ponašanjem s očvršćivanjem prema nominalnim karakteristikama za čelik S350 GD i kvalitetu vijka 8.8. Promjer vijaka koji služe kao sredstvo za sprezanje iznosi 12 mm, dok im visina iznosi 85 mm. Korištena su tri različita tipa posmične veze: veza koji ograničava relativni pomak između dvije površine (tie constraint, TC) - puna posmična veza (definirano u Abaqus/CAE); tip posmične veze postignut pozicioniranjem vijaka u parovima u sva-

ko rebro valovitog lima (kontinuirani raspored vijaka), slika 2.a, te pozicioniranjem jednog vijka u svako rebro valovitog lima, u naizmjeničnom rasporedu, slika 2.b.

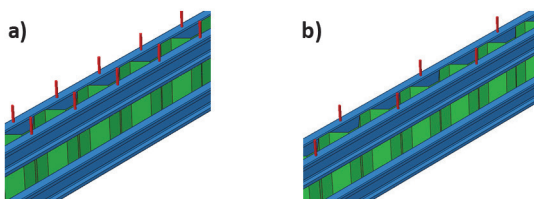
Tablica 1. Geometrijske karakteristike nosača

Hladno oblikovani čelični profil, C120	
Visina [mm], $h_a$	120
Debljina [mm], $t$	2,5
Širina pojasnice [mm], $b_a$	47
Dužina ojačanja [mm], $c$	21
Unutarnji radijus [mm], $r$	3
Posmične ploče	
Visina [mm], $h$	400, 500, 600
Debljina [mm], $t$	1,0
Valoviti hrbat	
Visina [mm], $h$	400, 500, 600
Debljina [mm], $t$	0,8, 1,0, 1,5
Valoviti lim za ploču	
Debljina [mm]	1,0
Visina rebra [mm], $h_p$	60
Betonska ploča, C25/30	
Ukupna visina, $h_c$ [mm]	120
Proračunska širina, $b_{eff}$ [mm]	1500



Slika 1. Geometrija analiziranog nosača

Vijci su definirani kao “beam” elementi s pridruženim poprečnim presjekom te su ugrađeni u betonsku ploču. S obzirom da ugrađeni elementi mogu biti pridruženi samo jednom elementu, gornja pojasnica CFS profila je povezana s donjim dijelom betonske ploče, kroz valoviti lim, spojem koji omogućava da pomak i rotacija prvog čvora budu jednaki drugom čvoru.



Slika 2. Raspored moždanika: a) u paru, b) naizmjenično

Ungureanu i dr. u radu [33, 34] su prikazali svojstva točkastih zavara u ovisnosti o debljini spojenih elemenata te su svojstva točkastih zavara potrebna za model preuzeta iz njihovog istraživanja. Položaj točkastih zavara analiziran je za dva slučaja. U prvom slučaju su C profili i CW spojeni u dvije dodirne točke, dok su u drugom slučaju spojeni u tri dodirne točke (slika 1). Položaj točkastih zavara na C profilima jednak je za sve tri razmatrane visine čeličnog nosača (visine odgovaraju uobičajenim visinama rešetkastih nosača), dok se broj točkastih zavara između valovitog hrpta i posmične ploče mijenja. Ujedno, razmatran je i slučaj kada su C profili spojeni s valovitim hrptom već opisanom TC vezom.

## 2.1 Analitički model

Kao posljedicu klasifikacije CFS elemenata u klase 3 i 4, plastičnu otpornost na savijanje nemoguće je dosegnuti. Međutim, za ovakve CFS elemente u spregnutim konstrukcijama čelik-beton, plastičnu otpornost na savijanje je moguće dosegnuti u slučaju pune posmične veze uzimanjem u obzir položaja plastične neutralne osi. Udaljenost neutralne osi od gornjeg ruba betonske ploče za slučaj pune posmične veze može se izračunati prema izrazu (1):

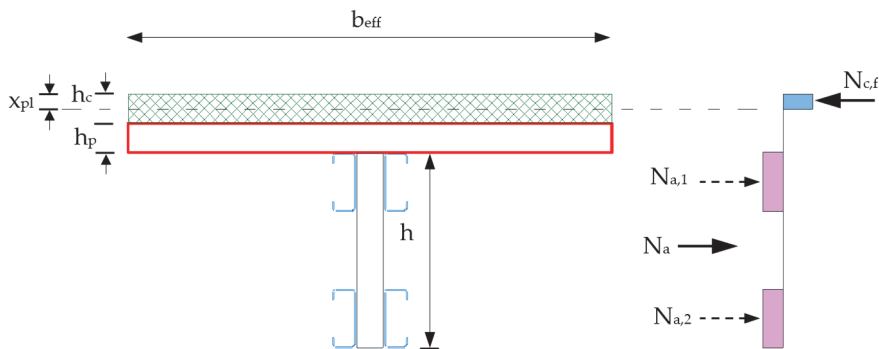
$$x_{pl} = \frac{4 \cdot A_a \cdot f_{yd}}{b_{eff} \cdot 0,85 \cdot f_{cd}} \quad (1)$$

gdje je  $A_a$  površina čeličnog profila,  $f_{yd}$  je proračunska vrijednost granice popuštanja,  $b_{eff}$  je proračunska širina betonske ploče i  $f_{cd}$  je proračunska tlačna čvrstoća betona. Za analizirane modele, prema izrazu (1), plastična neutralna os se nalazi na udaljenosti od 39.5 mm od gornjeg ruba betonske ploče. U slučaju pune posmične veze, izraz (2) i slika 3 daju podatke za izračun otpornosti na savijanje:

$$M_{pl,Rd} = b_{eff} \cdot x_{pl} \cdot 0.85 \cdot f_{cd} \left( \frac{h}{2} + h_c + h_p - \frac{x_{pl}}{2} \right) \quad (2)$$

Postavljanjem vijaka na uzdužnom razmaku od 240 mm u paru ili pojedinačno, uspostavljena je djelomična posmična veza u slučaju koje se otpornost na savijanje može procijeniti sljedećim izrazom:

$$M_{Rd} = M_{el,a,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{el,a,Rd}) \cdot \eta \quad (3)$$



Slika 3. Poprečni presjek razmatranog nosača

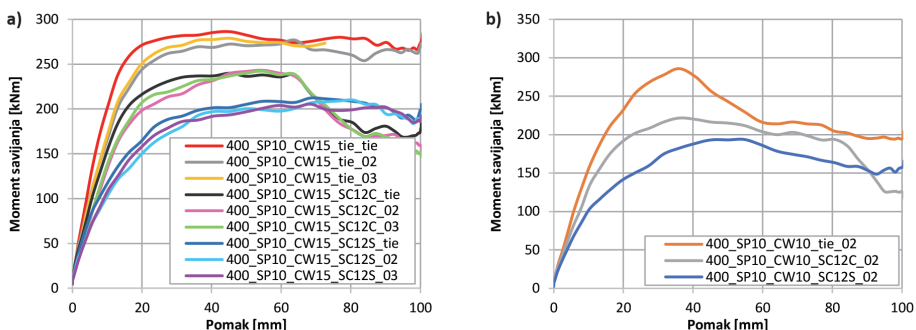
Izraz (3) prilagođen je izraz iz EN 1994-1-1 [35], gdje je umjesto plastične otpornosti na savijanje čeličnog dijela presjeka,  $M_{pl,a,Rd}$  uvedena elastična otpornost na savijanje čeličnog dijela presjeka,  $M_{el,a,Rd}$ . Uzimajući u obzir izraz (3) i punu posmičnu vezu za razmatrane nosače visina  $h = 400$  mm,  $h = 500$  mm i  $h = 600$  mm, otpornosti na savijanje redom iznose  $M_{Rd} = M_{pl,Rd} = 252$  kNm,  $M_{Rd} = M_{pl,Rd} = 294$  kNm and  $M_{Rd} = M_{pl,Rd} = 336$  kNm. Posmična otpornost moždanika s glavom, ako nosač sadrži čelični profilirani lim, mora se reducirati pomoću faktora smanjenja  $k_l$  ili  $k_t$  ovisno o smjeru rebara u odnosu na uzdužni smjer nosača, prema EN 1994-1-1 [35]. U slučaju analiziranog nosača rebra čeličnog profiliranog lima položena su okomito na smjer pružanja nosača, stoga se faktor smanjenja,  $k_t$ , računa prema izrazu (4):

$$k_t = \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left( \frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \quad (4)$$

gdje je  $n_r$  broj vijaka/moždanika u rebru čeličnog profiliranog lima,  $b_0$  iznosi 120 mm za razmatrani tip čeličnog profiliranog lima, prema [35], a  $h_{sc}$  je visina vijka. Međutim, prema izrazu danom u EN 1994-1-1, potpoglavlje 6.6.4.2. [35], izraz (4) se može primijeniti ako je zadovoljen uvjet  $f_u = 450$  N/mm<sup>2</sup>, koji nije bio ispunjen jer su korišteni vijci kvalitete 8.8. Za visinu čeličnog nosača  $h = 400$  mm, u slučaju postavljanja moždanika u parove, otpornost na savijanje s primijenjenim faktorom smanjenja iznosi 178 kNm, a u slučaju bez uporabe faktora smanjenja iznosi 252 kNm. Kada se broj moždanika dvostruko smanji, odnosno kada se oni postave naizmjenično, postiže se manja otpornost na savijanje koja u slučaju s primijenjenim faktorom smanjenja iznosi 140 kNm, dok bez spomenutog faktora iznosi 206 kNm. Izračunate otpornosti na savijanje bez faktora smanjenja,  $k_t$ , približno odgovaraju otpornostima dobivenim na modelima formiranim s TC vezom. Smanjenjem broja moždanika, otpornost na savijanje se smanjila za otprilike 25 %.

### 3 Parametarska numerička analiza

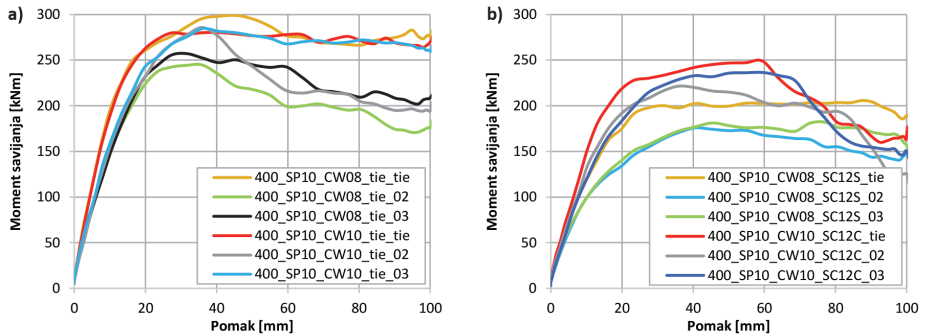
Parametarska numerička analiza provedena je kako bi se istražio utjecaj debljine valovitog hrpta (CW), broja točkastih zavora između C120 profila i CW (dva (02) ili tri (03) točkasta zavora), stupanj posmične veze (SC) koji je određen rasporedom vijaka (promjer 12 mm) pozicioniranih u parovima (SC12C) ili naizmjenično (SC12S), te utjecaja visine čeličnog presjeka (400 mm, 500 mm, 600 mm) na otpornost na savijanje spregnutog nosača. Slika 4.a prikazuje znatan utjecaj stupnja posmične veze na spregnuti nosač s debljinom CW od 1.5 mm te pokazuju da tip veze između čeličnih elemenata (tie veza, dva (02) ili tri (03) točkasta zavora) ima iznimno malen utjecaj na otpornost na savijanje. Slika 4.b prikazuje utjecaj stupnja posmične veze na modelima s dva točkasta zavora na svakom C profilu za visinu čeličnog dijela presjeka od 400 mm i debljinu CW od 1.0 mm. Puna posmična veza rezultirala je najvećom otpornošću na savijanje, dok je u slučaju naizmjeničnog rasporeda moždanika postignuta nešto manja otpornost na savijanje.



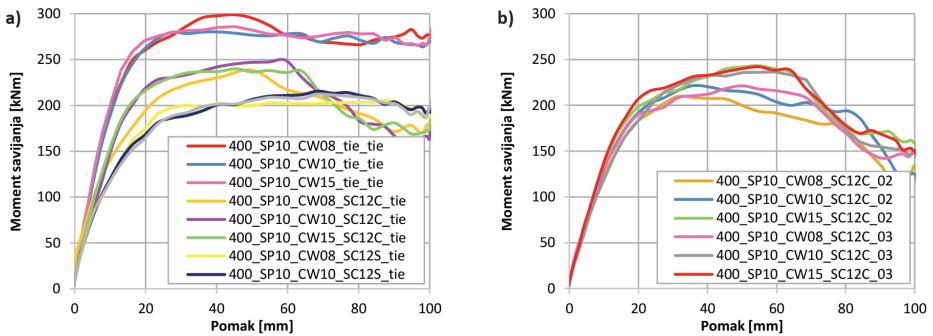
Slika 4. Utjecaj stupnja posmične veze: a) na modelima s debljinom CW od 1.5 mm, b) na modelima s debljinom CW od 1.0 mm i dva točkasta zavora na svakom C profilu

Utjecaj veze između čeličnih elemenata spregnutog nosača u slučaju debljine CW od 0,8 mm i 1,0 mm te za slučaju pune posmične veze prikazan je na slici 5.a. Ako su čelični elementi povezani TC vezom, spregnuti nosač postiže najveću krutost i otpornost na savijanje. U slučaju povezanosti čeličnih elemenata diskretnim SW, otpornost se smanjuje ovisno o broju zavora prisutnih u poprečnom presjeku što je vidljivo na slici 5.b. Također, debljina CW i broj SW u poprečnom presjeku u slučaju djelomične posmične veze imaju veći utjecaj na krutost na savijanje. Slike 6.a i 6.b prikazuju neznatan utjecaj debljine CW na otpornost na savijanje spregnutog nosača čelik-beton u slučaju djelomične posmične veze i tie veze između čeličnih elemenata. U slučaju pune posmične veze i TC veze između C profila i CW, "tie\_tie" veza, razmatrani modeli pokazuju visoku otpornost na savijanje, dok je u slučaju djelomične posmične veze, SC12C i SC12S, otpornost na savijanje manja. Iz rezultata

prikazanih na slici 6.a, zaključeno je da stupanj posmične veze ima znatan utjecaj na otpornost na savijanje. Slika 6.b prikazuje utjecaj debljine CW u slučaju djelomične posmične veze kada su moždanici pozicionirani u svakom rebro u paru, SC12C, za slučajeve povezivanja CFS C profila i CW preko dva (02) ili tri (03) zavara. Osim neznatnog utjecaja debljine CW na otpornost na savijanje spregnutog nosača, koji je prikazan na slici 6.a, u slučaju kad su u presjeku prisutni točkasti zavari, utjecaj debljine CW se ne može zanemariti, slika 6.b.

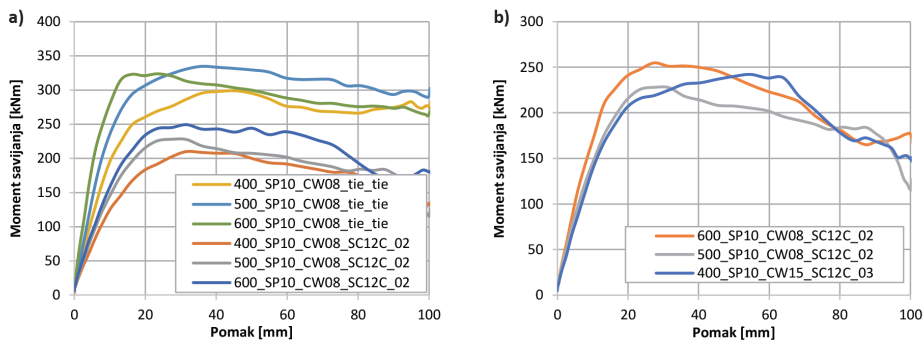


Slika 5. Utjecaj broja SW na otpornost na savijanje: a) puna posmična veza, TC veza, b) djelomična posmična veza



Slika 6. Utjecaj debljine valovitog hrpta: a) TC veza između čeličnih elemenata, b) djelomična posmična veza - moždanici u paru

Slika 7.a pokazuje rezultate utjecaja visine čeličnog presjeka s debljinom CW od 0,8 mm na otpornost i krutost na savijanje u slučaju pune i djelomične posmične veze gdje je značajno smanjena otpornost na savijanje dok je krutost na savijanje slična slučaju pune posmične veze.



Slika 7. Utjecaj visine čeličnog nosača: a) debljina CW od 0.8 mm s punom i djelomičnom posmičnom vezom, b) na modelima s različitim brojem SW

Slike 7.a i 7.b pokazuju kako razmatrane visine čeličnog dijela poprečnog presjeka nemaju značajni utjecaj na otpornost na savijanje za slučaj graničnog stanja nosivosti, dok u slučajevima gdje je bitna krutost na savijanje, kao što je u slučajevima graničnog stanja uporabljivosti, razmatrani čelični nosači mogu postići povoljnije rezultate. Nadalje, debljine čeličnih elemenata i odgovarajuće karakteristike te broj SW znatno utječu na otpornost i krutost na savijanje. Slika 7.b prikazuje rezultate za spregnuti nosač s visinom čeličnog dijela presjeka od 400 mm s tri točkasta zavora te debljinom CW od 1,5 mm koji može postići približnu otpornost na savijanje kao i spregnuti nosač s većom visinom s dva SW i debljinom CW od 0,8 mm. Uspoređujući analitičke izračunate otpornosti za slučaj pune posmične veze, zaključeno je kako su te otpornosti ostvarene samo u slučajevima kada su svi elementi čeličnog presjeka povezani TC vezom. U slučaju kada su primijenjeni SW, slika 7.b, analitički dobivene otpornosti za različite visine presjeka nisu realizirani zbog utjecaja diskretnih SW i smanjenog stupnja posmične veze. Analizirajući numerički dobivene rezultate i analitički dobivene rezultate za djelomičnu posmičnu vezu, zaključeno je kako su rezultati s provedenim smanjenjem pomoću faktora smanjenja,  $k_v$ , ostvareni za sve modele. Međutim, rezultati dobiveni bez faktora smanjenja nisu ostvareni. Ovakvi rezultati pokazuju potrebu za smanjenjem posmične otpornosti moždanika, što je potrebno detaljnije istražiti.



## 4 Zaključak

Pregled literature pokazao je značajan potencijal za daljnji razvoj spregnutih konstrukcijskih rješenja upotrjebljujući CFS profile i inovativna rješenja posmične veze. Ovakav potencijal proizlazi iz inženjerskog, socioekonomskog i ekološkog gledišta za razvoj održivog i otpornog ekosustava implementiranog u suvremeni okoliš. Numerički i analitički rezultati prikazanog spregnutog sustava sastavljenog od CFS profila i betonske ploče pokazali su kako ovaj tip sustava međukatne konstrukcije ima odličnu otpornost na savijanje. Ujedno, velika prednost ovog sustava je smanjena vlastita težina i jednostavnije rukovanje prilikom ugradnje. Numerički rezultati pokazali su da stupanj posmične veze i način spajanja čeličnih elemenata imaju najveći utjecaj na otpornost na savijanje dok debljina CW, broj točkastih zavara te razmatrane visine presjeka nemaju značajan utjecaj. Također, pokazano je kako je moguće postići slične razine otpornosti nosača promjenom broja točkastih zavara te u slučaju promjene visine čeličnog dijela presjeka. Analitički i numerički rezultati su usporedivi za punu posmičnu vezu i za slučaj kada su čelični elementi u presjeku potpuno povezani. Daljnja istraživanja potrebna su za diskretne točkaste zavare između čeličnih elemenata presjeka. U slučaju djelomične posmične veze, uspoređujući analitički i numerički dobivene rezultate, zaključeno je kako korištena prilagodba izraza iz Eurocode-a 4 može dati zadovoljavajuće vrijednosti analitički izračunate otpornosti na savijanje uz upotrebu faktora smanjenja,  $k_c$ .

## Financiranje

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

## Literatura

- [1] Ahmed, I.M., Tsavdaridis, K.D.: The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and eurocode design approaches, *Journal of Constructional Steel Research* (2019);155, pp. 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.007>.
- [2] Hanaor, A.: Tests of composite beams with cold-formed sections, *Journal of Constructional Steel Research* (2000);54, pp. 245-64. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00046-2).
- [3] Lukačević, I., Ćurković, I., Rajić, A., Bartolac, M.: Lightweight Composite Floor System—Cold-Formed Steel and Concrete—LWT-FLOOR Project, *Buildings* (2022), 12, <https://doi.org/10.3390/buildings12020209>.

- [4] Lakkavalli, B.S., Liu, Y.: Experimental study of composite cold-formed steel C-section floor joists, *Journal of Constructional Steel Research* (2006);62, pp. 995-1006. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.02.003>.
- [5] Hsu, C.T.T., Punurai, S., Punurai, W., Majdi, Y.: New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab, *Engineering Structures* (2014);71, pp. 187-200. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.011>.
- [6] Alhajri, T.M., Tahir, M.M., Azimi, M., Mirza, J., Lawan, M.M., Alenezi, K.K.: Behavior of pre-cast U-Shaped Composite Beam integrating cold-formed steel with ferro-cement slab, *Thin-Walled Structures* (2016);102:18-29. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.01.014>.
- [7] Saggaff, A., Tahir, M.M., Azimi, M., Alhajri, T.M.: Structural aspects of cold-formed steel section designed as U-shape composite beam, *AIP Conf Proc* 2017;1903. <https://doi.org/10.1063/1.5011505>.
- [8] Khadavi, K., Tahir, M.M.: Prediction on flexural strength of encased composite beam with cold-formed steel section, *AIP Conf Proc* 2017;1903. <https://doi.org/10.1063/1.5011496>.
- [9] Leal, L.A.A. d. S, Batista, E. de M.: Composite floor system with cold-formed trussed beams and pre-fabricated concrete slab, *Stability and Ductility Steel Structures - Proc Int Colloq Stab Ductility Steel Struct* (2019);13, pp. 682-90. <https://doi.org/10.1002/stco.201900046>.
- [10] de Seixas Leal, L.A.A., de Miranda Batista, E.: Composite floor system with cold-formed trussed beams and prefabricated concrete slab: Selected and extended contribution of SDSS 2019. *Steel Constr* (2020);13, pp. 12-21. <https://doi.org/10.1002/stco.201900046>.
- [11] Tian, L., Kou, Y., Hao, J., Zhao, L.: Flexural performance of a lightweight composite floor comprising cold-formed steel trusses and a composite mortar slab, *Thin-Walled Structures* (2019);144:106361. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106361>.
- [12] Salih, M.N.A., Md Tahir, M., Mohammad, S., Ahmad, Y., Sulaiman, A., Shek, P.N.: Experimental study on flexural behaviour of partially encased cold-formed steel composite beams using rebar as shear connector, *IOP Conf Series: Materials Science Engineering* (2019);513. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/513/1/012038>.
- [13] Elsawaf, S.A., Bamaga, S.O.: Strength capacity and failure mode of shear connectors suitable for composite cold formed steel beams: Numerical study, *Materials (Basel)* (2021);14. <https://doi.org/10.3390/ma14133627>.
- [14] Jakovljević, I., Spremić, M., Marković, Z.: Demountable composite steel-concrete floors: A state-of-the-art review, *Građevinar* (2021);73, pp. 249-63. <https://doi.org/10.14256/JCE.2932.2020>.

- [15] Bamaga, S.O., Tahir, M.M., Tan, C.S., Shek, P.N., Aghlara, R.: Push-out tests on three innovative shear connectors for composite cold-formed steel concrete beams, *Constr Build Mater* (2019);223, pp. 288-98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.223>.
- [16] Wang, J.-Y., Guo, J.-Y., Jia, L.-J., Chen, S.-M., Dong, Y.: Push-out tests of demountable headed stud shear connectors in steel-UHPC composite structures, *Compos Struct* (2017);170, pp. 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.004>.
- [17] Yang, F., Liu, Y., Jiang, Z., Xin, H.: Shear performance of a novel demountable steel-concrete bolted connector under static push-out tests, *Engineering Structures* (2018);160, pp. 133-46. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.005>.
- [18] Dar, M.A., Subramanian, N., Dar, A.R., Ghowsi, A.F., Siddiqui, F., Fayaz, S.: Comparison of various shear connectors for improved structural performance in CFS concrete composite slabs, *Engineering Structures* (2020);220,111008. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111008>.
- [19] Shirgaonkar, A.A., Patil, Y.D., Patil, H.S.: Influence of stiffeners and pattern of shear screws on behaviour of cold formed profiled deck composite floor, *Case Study in Construction Materials* (2021);15:e00572. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00572>.
- [20] Landolfo, R., Mammana, O., Portioli, F., Di Lorenzo, G., Guerrieri, M.R.: Laser welded built-up cold-formed steel beams: Experimental investigations, *Thin-Walled Structures* (2008);46:781-91. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.03.009>.
- [21] Dubina, D., Ungureanu, V., Gîlia, L.: Cold-formed steel beams with corrugated web and discrete web-to-flange fasteners, *Steel Construction* (2013);6:74-81. <https://doi.org/10.1002/stco.201310019>.
- [22] Dubina, D., Ungureanu, V., Dogariu, A.: Lightweight Footbridges of Cold Formed Steel Corrugated Web Beams: Technical Solution And Evaluation, 8th Int. Symp. Steel Bridg. Innov. New Challenges, Istanbul, 2015
- [23] Ungureanu, V., Dubina, D.: Influence of Corrugation Depth on Lateral Stability of Cold-Formed Steel Beams of Corrugated Webs, *Acta Mech Autom* (2016);10:104-11. <https://doi.org/10.1515/ama-2016-0017>.
- [24] Dubina, D., Ungureanu, V., Gîlia, L.: Experimental investigations of cold-formed steel beams of corrugated web and built-up section for flanges, *Thin-Walled Structures* (2015);90:159-70. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.01.018>.
- [25] Ungureanu, V., Both, I., Burca, M., Tunea, D., Grosan, M., Neagu, C.: Welding technologies for built-up cold-formed steel beams: experimental investigations, Ninth Int. Conf. Adv. Steel Struct., Hong Kong, China, 2018, e-Proceedings.

- [26] Ungureanu, V., Both, I., Burca, M., Grosan, M., Neagu, C., D. D.: Built-up cold-formed steel beams using resistance spot welding: experimental investigations, Eighth Int. Conf. Thin-Walled Structures (ICTWS 2018), Lisbon, Portugal, 2018
- [27] Benzar, Ş., Ungureanu, V., Dubină, D., Burcă, M.: Built-Up Cold-Formed Steel Beams with Corrugated Webs Connected with Spot Welding,. *Adv Mater Res* (2015);1111:157-62. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1111.157>.
- [28] Ungureanu, V., Lukačević, I., Both, I., Burca, M.: Numerical investigation of built-up cold-formed steel beams connected by spot welding, 20th Congr. IABSE, New York City 2019 Evol. Metrop. - Rep., 2019.
- [29] Ungureanu, V., Lukačević, I., Both, I., Dubina, D.: Numerical investigations on built-up cold-formed steel beams for long spans. *ce/papers* (2021);4:2277-84. <https://doi.org/10.1002/cepa.1550>.
- [30] Ungureanu, V., Both, I., Burcă, M., Huang Nguyen, T., Grosan, M., Dubina, D.: Experimental investigations on spot welded built-up cold-formed steel beams, vol. 64. 2018.
- [31] Corp DSS. Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS, User's Manual 2016.
- [32] European Committee for Standardization (CEN). European standard EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Bruxelles: 2005.
- [33] Ungureanu, V., Both, I., Tunea, D., Grosan, M., Neagu, C., Georgescu, M.: Experimental investigations on built-up cold-formed steel beams using mig brazing 2018.
- [34] Both, I., Ungureanu, V., Tunea, D., Crisan, A., Grosan M.: Experimental and numerical investigations on cold- formed steel beams assembled by mig brazing, 2018.
- [35] European Committee for Standardization CEN. EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.



# Mogućnosti primjene bespilotnih letjelica za pregled i praćenje stanja mostova

Jurica Pajan<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Ivan Duvnjak<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

Starenje i degradacija mostova postaje sve veći teret za sustave gospodarenja prometnom infrastrukturom s obzirom da zahtijeva sve veća ulaganja u održavanje velikog broja mostova. Značajne uštede mogu se ostvariti pravovremenom izvedbom radova održavanja. Da bi se to postiglo, nužno je unaprijediti postojeće metode pregleda i praćenja stanja mostova kako bi njihovo provođenje postalo jeftinije, brže i pouzdanije. Na tržištu se u posljednjih desetak godina pojavio velik broj bespilotnih letjelica, a njihova primjenjivost za ocjenu stanja mostova prikazana je u ovom radu. Rad uključuje sljedeće: prikaz karakteristika i kriterija odabira bespilotne letjelice i pripadne opreme za prikupljanje podataka o stanju mostova; opis primjene bespilotnih letjelica za provedbu vizualnog pregleda; mogućnosti monitoringa mostova koristeći bespilotne letjelice; osvrt na ključne nedostatke koji ograničavaju njihovu primjenu u svakodnevnoj praksi.

*Ključne riječi: mostovi, bespilotne letjelice, ocjena stanja, vizualni pregled, monitoring*

## Possibilities of unmanned aerial vehicles for bridge inspection and monitoring

### Abstract

The aging and deterioration of bridges is becoming an increasing burden for transportation management systems as it requires increasing investments for the proper maintenance of a large number of bridges. Significant savings can be achieved by timely maintenance work. To achieve this, it is necessary to improve existing methods of inspection and monitoring of the condition of bridges to make their implementation cheaper, faster, and more reliable. In the last ten years, a significant number of unmanned aerial vehicles have appeared on the market. This paper presents their applicability for assessing the condition of bridges. It includes the following: important characteristics and selection criteria of unmanned aerial vehicles and associated equipment for collecting data on the condition of bridges; a description of the application of unmanned aerial vehicles to conduct a visual inspection on bridges; possibilities of monitoring bridges using data recorded by the unmanned aerial vehicle; a review of the key shortcomings that limit their application in everyday practice.

*Key words: bridges, unmanned aerial vehicles, condition assessment, bridge inspection, structural health monitoring*

## 1 Uvod

Osiguranje učinkovitosti i ekonomičnosti u sustavima gospodarenja mostovima u Hrvatskoj postaje sve izazovnije zbog velike i razgranate prometne mreže s velikim brojem mostova - više od 3180 objekata u cestovnoj i 548 mostova u željezničkoj infrastrukturi [1]. Čest je slučaj da su postojeći mostovi projektirani i izvedeni prema starijim propisima i tehničkoj praksi te zbog toga nisu u stanju preuzeti današnja opterećenja i zadovoljiti visoke standarde sigurnosti koje propisuju današnji propisi [2]. Unatoč tome, zbog ekonomskih i društvenih razloga potrebno ih je zadržati u upotrebi [3]. Kada svemu tome dodamo neizbježnu degradaciju konstrukcije (materijala) uslijed eksploatacije i atmosferskih djelovanja, uviđa se važnost redovitih pregleda konstrukcije te provođenja pravovremenih radova održavanja i rekonstrukcije s ciljem osiguranja sigurnosti prometne infrastrukture.

Pregledima se nastoji utvrditi stanje konstrukcije i materijala, pogotovo elemenata konstrukcije mosta ključnih za sigurnost i funkcioniranje građevine u cjelini. Pregled se provodi u dva osnovna koraka: i) prikupljanje podataka o stanju konstrukcije; ii) obrada, interpretacija te elaboriranje prikupljenih podataka s ciljem utvrđivanja postojećeg stanja. Postojeće stanje utvrđuje se na temelju provedenog vizualnog pregleda, prikladnih statičkih ili dinamičkih ispitivanja te uvidom u dokumentaciju građevine [4]. Postojeće metode pregleda su skupe, dugotrajne, teško ponovljive, a prikupljeni podaci, iako neophodni za učinkovitost sustava gospodarenja objektima, često su rezultat subjektivne procjene bazirane isključivo na stručnosti osobe koja provodi pregled. Svi navedeni nedostaci posebno dolaze do izražaja nakon izvanrednih djelovanja, poput potresa i poplava kada je važno u što kraćem vremenu dati pouzdanu ocjenu postojećeg stanja uz istovremeno osiguranje sigurnosti korisnika i osoba koje provode pregled. Iz svega navedenog, jasno proizlazi potreba za razvojem novih metoda koje će osigurati učinkovitiju, jednostavniju i pouzdanju procjenu stanja mostova.

Bespilotne letjelice, koje su s razvojem tehnologije postale sve dostupnije i za civilne potrebe, nalaze sve veću primjenu u različitim područjima društvenih aktivnosti. Pod pojmom bespilotna letjelica u ovom se članku podrazumijeva složen sustav koji se sastoji od letjelice koja je daljinski upravljana, programirana ili autonomna [5] i opreme koju ona nosi – kamere i ostala osjetila. Njihov potencijal da unaprijede postojeću praksu pregleda mostova prepoznat je u radovima [6-8] a kao osnovna motivacija za korištenje navodi se mobilnost i mogućnost da teško dostupne dijelove mosta snime iz neposredne blizine bez upotrebe skupe opreme za osiguranje pristupa. Time, dio pregleda mosta koji se odnosi na prikupljanje podataka na terenu, može postati brži, jeftiniji i sigurniji.

Korištenje bespilotnih letjelica također za sobom povlači i pojedina ograničenja. Dio njih vezan je uz regulatorna ograničenja leta, a dio na tehnička ograničenja letje-

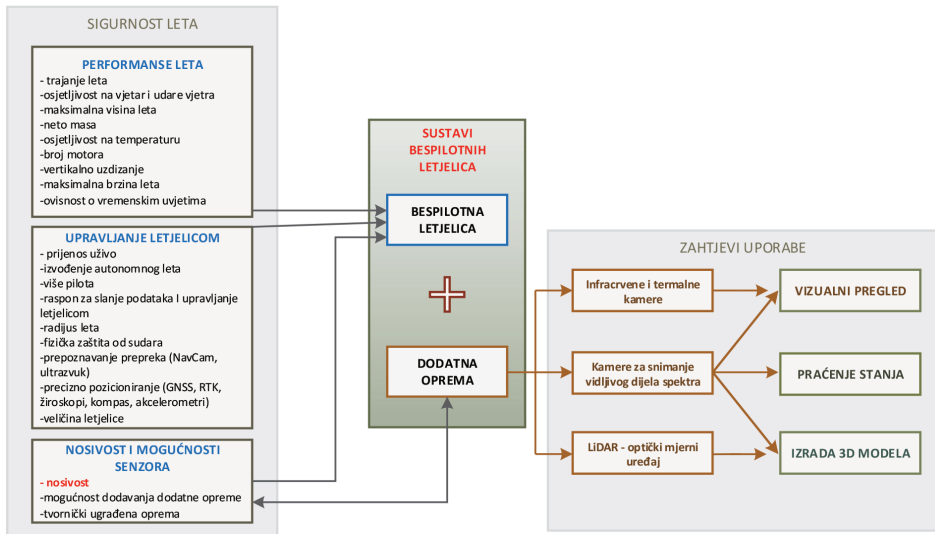
lice. Unatoč brzom razvoju tehnologije bespilotnih letjelica, mogućnost kontakta letjelice s konstrukcijom za potrebe ispitivanja još uvijek se smatra izuzetno problematičnim, tako da je njihova praktična primjena uvelike ograničena isključivo na beskontaktno metode [6]. Prikupljeni podaci u obliku fotografija ili videozapisa bez dodatne obrade ne daju dovoljno informacija o cjelokupnom stanju konstrukcije, a njihova obrada i dalje predstavlja značajan izazov za brojne istraživače. Velika količina prikupljenih podataka u obliku foto i video sadržaja može biti problem za ručnu obradu, a sam podatak o postojanju nedostataka, bez informacija o položaju na konstrukciji često je nedovoljan za bilo kakvu procjenu stanja. Iz tog razloga mogućnosti upotrebe bespilotnih letjelica i pripadne opreme nužno je razmatrati s mogućim metodama obrade prikupljenih podataka kako bi dobivene informacije uistinu bile relevantne za sustave gospodarenja i održavanja mostova.

U ovom radu dan je pregled najvažnijih karakteristika bespilotnih letjelica za pregled mostova. Razmatrane su mogućnosti njihove primjene zajedno s prikladnim metodama za obradu prikupljenih podataka u cilju unapređenja pojedinih aktivnosti koje se provode u sklopu pregleda mosta, a važne su za procjenu postojećeg stanja i planiranje aktivnosti redovitog održavanja.

## 2 Odabir sustava bespilotnih letjelica za pregled mostova

Na tržištu postoji velik broj komercijalnih bespilotnih letjelica, njihovu prikladnost za pregled mostova potrebno je detaljno razmotriti s obzirom na specifične okolnosti u kojima se pregled odvija, ograničenja samog sustava i ciljeve pregleda. Zbog slabe dostupnosti GNSS signala, smetnji u radu kompasa uslijed prisutnosti velikih količina metala te turbulencija koje se javljaju u okolini mosta, let letjelicom u blizini mosta može biti rizičan, a korištenje letjelice ograničeno samo na snimanje pojedinih dijelova mosta. Rizici njihova korištenja vezani uz sam postupak prikupljanja podataka mogu se minimizirati ispravnim odabirom bespilotnih letjelica opremljenih sustavima osjetila kojima se poboljšavaju performanse i sigurnost leta. Metoda za evaluaciju pojedinih vrsta bespilotnih letjelica dana je u radu [9], a bazira se na ukupno 32 kriterija na temelju kojih se može provesti vrednovanje bespilotnih letjelica. Navedeni kriteriji u prvom se redu odnose na tehničke karakteristike same letjelice i sustava za upravljanje, a za vrednovanje njihove primjene s građevinskog aspekta važno je u obzir uzeti i mogućnosti osjetila i dodatne opreme, koji se mogu ugraditi/ili su tvornički ugrađeni na letjelicu, a bitni su za efikasno prikupljanje relevantnih podataka o stanju objekta. Na *slici 1.* prikazan je postupak odabira sustava bespilotnih letjelica za prikupljanje podataka o stanju mostova baziran na dva osnovna kriterija: prvi kriterij odnosi se na odabir bespilotne letjelice u cilju osiguranja sigurnosti leta, a drugi se odnosi na zahtjeve vezane uz njihovu primjenu.





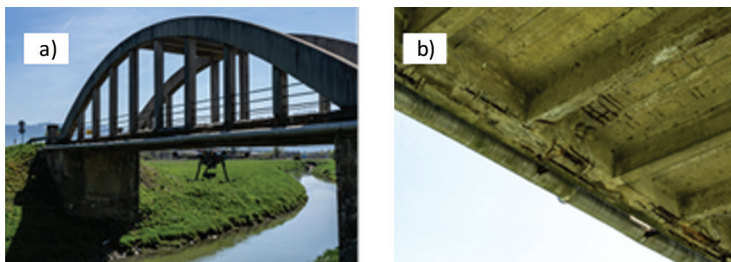
Slika 1. Postupak odabira sustava bespilotnih letjelica za prikupljanje podataka o stanju mostova

Nosivost letjelice još uvijek predstavlja glavno ograničenje za odabir dodatne opreme, stoga je njihov odabir ograničen na osjetila male mase. Komercijalni sustavi u pravilu su opremljeni kamerama za snimanje vidljivog dijela spektra (spektralni raspon s valnim duljinama od 390 do 700 nm). Također, termalne i infracrvene kamere te LiDAR (engl. *Light Detection And Ranging*) dostupni su za ugradnju na letjelicu. LiDAR je optički mjerni instrument koji mjeri udaljenosti i stvara prikaz predmeta ili područja interesa projicirajući snop svjetlosti, a može se koristiti za pozicioniranje letjelice ili za snimanje geometrije mosta [10]. Dodatnu opremu potrebno je izabrati ovisno o namjeni za koju želimo koristiti bespilotnu letjelicu. U nastavku su dani primjeri i mogućnosti korištenja bespilotnih letjelica s pripadnom dodatnom opremom za potrebe provođenja vizualnog pregleda te pojedinih mjerenja važnih za ocjenu, praćenje i održavanje mostova.

### 3 Vizualni pregled

Najveća prednost primjene bespilotnih letjelica očituje se upravo u njihovom korištenju za obavljanje vizualnog pregleda. Vizualnim pregledom nastoje se uočiti nedostaci koji mogu narušiti pravilno funkcioniranje građevine, dovesti do otkazivanja pojedinih elemenata ili u većoj mjeri ugroziti projektiranu trajnost. Takvi nedostaci najčešće su u obliku površinskih oštećenja poput pukotina, odlamanja betona, lošeg stanja antikorozivne zaštite ili promjena u strukturi materijala, odnosno geometrije (oblika) u odnosu na izvedeno stanje.

Za razliku od klasičnih metoda vizualnog pregleda, koje zahtijevaju skupu opremu za osiguranje pristupa kako bi se pregledao element konstrukcije s prikladne udaljenosti, vizualni pregled koji se oslanja na korištenje bespilotnih letjelica, u najjednostavnijem kontekstu, zahtijeva vještog pilota letjelice koji može dovesti letjelicu u takav položaj da s kamerom može snimiti određeni dio mosta (slika 2). Uspjeh takvog pregleda u najvećoj mjeri ovisi o mogućnosti snimanja fotografije dovoljne kvalitete, rezolucije i detaljnosti kako bi se s određenom razinom sigurnosti mogla utvrditi moguća oštećenja ili drugi nedostaci. Slaba osvjetljenost, refleksije svjetlosti od različitih površina, nestabilnost letjelice zbog rotacija i pomaka prilikom leta narušavaju kvalitetu fotografija i videozapisa. Kamere visoke rezolucije s mogućnosti zumiranja i podešavanja ekspozicije u kombinaciji s mehanizmima za kompenziranje pomaka letjelice mogu minimizirati navedene probleme i omogućiti snimanje fotografija dovoljne kvalitete. Također, radi osiguranja potpunosti pregleda važno je da kamera ima mogućnost snimanja prema gore, kako bi se mogao snimiti i podgled rasponske konstrukcije. Osim kamere, za obavljanje vizualnog pregleda mostova važno je odabrati sustav koji ima mogućnost pregledavanja snimki u realnom vremenu tako da se procjena njihove prikladnosti te otkrivanje mogućih nedostataka može obaviti na terenu za vrijeme trajanja pregleda/leta.

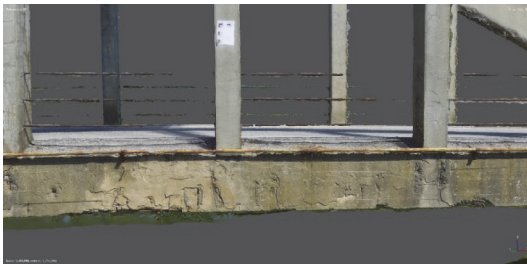


Slika 2. Vizualni pregled mosta primjenom bespilotne letjelice: a) snimanje konstrukcije; b) Korozija armature u podgledu rasponske konstrukcije

Detekcija oštećenja s prikupljenih fotografija ili videozapisa može se obaviti ručnim pregledavanjem te klasifikacijom i procjenom oštećenja prema postojećoj praksi vizualnih pregleda. Ovakav pristup obrade prikupljenih podataka je dugotrajan, podložan greškama i u pravilu primjenjiv samo za veće razmjere oštećenja s naglaskom na evidenciju postojećih oštećenja. Pouzdano kvantificiranje oštećenja, odnosno određivanje veličina poput debljine pukotine, površina zahvaćenih ljuštenjem betona, delaminacija, izmjera geometrije i promjene u geometriji može se postići isključivo primjenom naprednih metoda obrade fotografija ili video zapisa kao što su računalni vid i strojno učenje. Detaljan pregled primjene razvijenih metoda računalnog vida za potrebe pregleda i praćenja stanja infrastrukturnih objekata dan je u radu [11]. Načelno, algoritmi za obradu slike mogu unaprijediti preciznost i učinko-

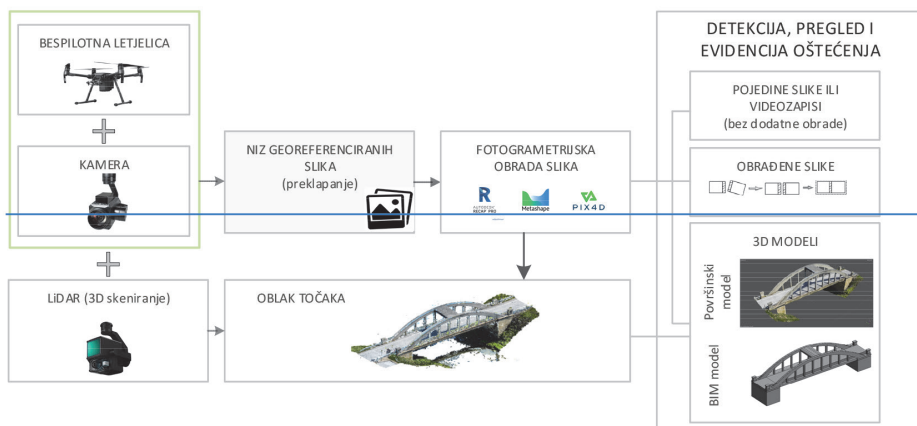
vitost otkrivanja oštećenja s fotografija na način da ih poboljšaju i filtriraju tako da je oštećenja lakše uočiti ili da autonomno otkrivaju oštećenja. Dorafshan i ostali [12] razvili su algoritam koji je uspoređivao primjenjivost postojećih algoritama za detekciju rubova na slici i njihove primjenjivosti za otkrivanje pukotina na fotografijama snimljenim s bespilotnom letjelicom. Dobiveni rezultati uspoređivani su na primjerima pukotina poznatih dimenzija i položaja. Utvrđeno je kako najveću točnost i preciznost u utvrđivanju dimenzije najmanje pukotine daje Laplaceov rubni operator (engl. *Laplacian of Gaussian; LoG*) koji je pokazao najveću točnost (92 %), preciznost (88 %) te najkraće vrijeme obrade (1,18 s po slici). Osim toga, dokazan je potencijal njegove primjene u detekciji pukotina u realnom vremenu. Dodatno, algoritmi za detekciju rubova mogu se koristiti s tehnikama kao što su konvolucijske neuronske mreže dubokog učenja (engl. *Deep Learning Convolutional Neural Network*), a rezultati u otkrivanju pukotina mogu konkurirati onima koje uoče inženjeri kada ručno pregledavaju snimke oštećenja [13].

Značajan napredak u odnosu na klasične metode vizualnog pregleda mostova može se postići izradom detaljnih digitalnih 3D modela tako da se djelomični pregled mosta može provesti u digitalnom okruženju. Ovakav pristup pruža jednostavnu i ponovljivu mogućnost pregleda konstrukcije te olakšava prikaz i interpretaciju prikupljenih rezultata. Na slici 3 dan je prikaz stanja rasponske konstrukcije dobiven iz generiranog 3D modela. 3D model mosta može efikasno prikazati veća oštećenja te poslužiti za određivanje geometrije i površina potrebnih za sanaciju, čime se mogu točnije odrediti troškovi i obuhvat izvedbe pojedinih radova sanacije.



Slika 3. Prikaz oštećenja u digitalnom 3D modelu mosta

Značajno ograničenje ovakvog pristupa je nemogućnost prepoznavanja oštećenja malih razmjera i sitnih pukotina. Otkrivanje manjih oštećenja još uvijek se bazira na obradi slike čija je obrada prethodno opisana, a učinkovita primjena može se postići integracijom oba pristupa (slika 4). Dobiveni 3d modeli mogu služiti za definiranje autonomnog leta letjelice i za prikaz rezultata vizualnog pregleda.



Slika 4. Vizualni pregled baziran na korištenju bespilotne letjelice i pripadne opreme

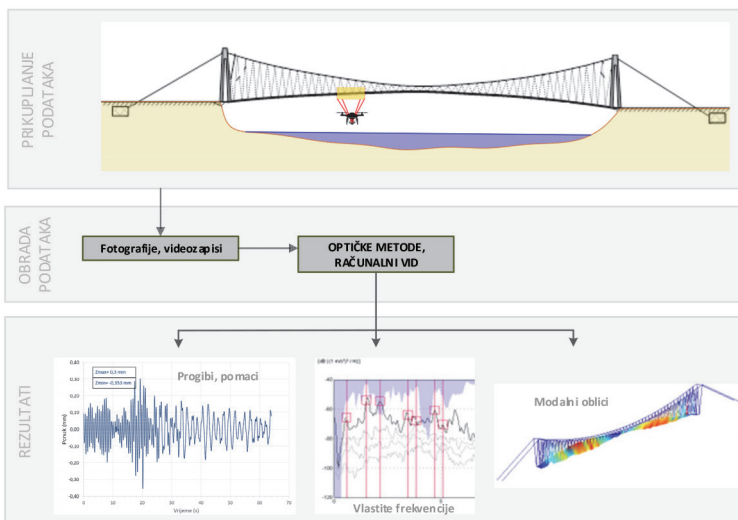
Osim kamera za snimanje u vidljivom dijelu spektra, čija je primjena prethodno opisana, bespilotne letjelice mogu biti opremljene termalnim i infracrvenim kamerama. Infracrvena termografija prepoznata je kao nerazorna metoda ispitivanja koja može otkriti oštećenja koja nisu površinska, poput ljuštenja ili odvajanja betona. Kod mostova, termografija je ograničena samo na pasivan pristup pri kojem se koristi ambijentalna temperatura mosta generirana temperaturnim utjecajima iz okoline. Aktivna termografija je neopravdana za primjenu na mostovima jer bi zahtijevala grijanje ili hlađenje čitavog mosta. Primjena bespilotne letjelice opremljene infracrvenom kamerom za detekciju delaminacije betona na probnom uzorku razmatrana je u radu [14]. Ispitivanjem je utvrđeno kako je razlika između rezultata dobivenih ručnom kamerom i kamerom montiranom na bespilotnu letjelicu minimalna. Za učinkovito otkrivanje delaminacije potrebno je osigurati dovoljan temperaturni kontrast ( $>0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), čiji raspon ovisi o okolišnim uvjetima, debljini promatranog elementa i karakteristikama oštećenja [15]. Pojedini dijelovi mosta mogu biti više ili manje izloženi ambijentalnom zagrijavanju, stoga je primjena pasivne termografije na mostu u realnim uvjetima uvelike ograničena.

#### 4 Monitoring mostova

Monitoring se provodi na složenim građevinskim konstrukcijama, a obuhvaća dugotrajno mjerenje mehaničkih i fizikalnih veličina kojima se može opisati ponašanje konstrukcije i osigurati njihovo pouzdano korištenje. U sklopu monitoringa te prilikom pregleda mostova, često se provode statička i dinamička mjerenja koja koriste kontaktne senzore koji mogu efektivno prikupiti podatke, ali su izrazito skupi za postavljanje i održavanje. Primjena bespilotnih letjelica za provođenje mjerenja, zbog

trenutnog ograničenja na beskontaktno metode u najvećoj mjeri ovisi o mogućnostima metoda računalnog vida da iz podataka u obliku fotografija ili videozapisa daju podatke relevantne za opisivanje ponašanja konstrukcije poput pomaka, deformacija ili pojedinih dinamičkih parametara (vlastite frekvencije ili modalni oblici). Videozapise možemo smatrati nizom slika u određenom vremenskom razmaku, drugim riječima, videozapisi slikama daju vremensku dimenziju. Opći princip mjerenja baziran na upotrebi bespilotnih letjelica prikazan je na slici 5. Kontinuitet mjerenja, koji je važan za sustave monitoringa, teško je postići korištenjem bespilotne letjelice zbog trajanja leta ograničenog kapacitetom baterije, a veća učestalost mjerenja može se povećati autonomnim letom.

Praćenje stanja konstrukcija bazirano na optičkim metodama (engl. *Vision-based Structural Health Monitoring - SHM*) već je dugo predmet brojnih istraživanja. Yoneyama i ostali [16] koristili su digitalnu korelaciju slike (engl. *Digital Image Correlation*) za određivanje progiba nosača. Odstupanje vrijednosti progiba određenog korelacijom digitalne slike i onoga dobivenog primjenom induktivnih osjetila za mjerenje pomaka bilo je neznatno. Također, određena je ukupna distribucija pomaka duž nosača mosta, a ne samo u diskretnim točkama kao što je slučaj kod klasičnih mjernih metoda. Sličan pristup obradi slika provjeravan je u radu [17], ali s kamerom za prikupljanje podataka ugrađenom na bespilotnu letjelicu. Dokazano je da nestabilnosti u letu bespilotne letjelice ne utječu u većoj mjeri na rezultate mjerenja zbog postojećih mehanizama za kompenziranje pomaka. Yoon i ostali [18] u svom su radu odredili apsolutnu vrijednost pomaka konstrukcije primjenom bespilotne letjelice opremljene komercijalnom kamerom. Navedena metoda testirana je u laboratorijskim i realnim uvjetima na mostu, a dobiveni rezultati bili su zadovoljavajuće preciznosti.



Slika 5. Princip mjerenja koristeći bespilotne letjelice

Marchewka i ostali [19] razvili su metodu za praćenje pomaka zakovica kod čeličnih mostova primjenom bespilotne letjelice i računalnog vida s ciljem otkrivanja kritičnih spojeva. Osim toga, razvili su model za detekciju korodiranih dijelova na čeličnoj konstrukciji mosta. Primjena bespilotnih letjelica razmatrana je i za određivanje vlačne sile u zategama mosta [20]. U laboratorijskom ispitivanju, razlika između vlačne sile u zatezi određene primjenom razlike u vlastitim frekvencijama dobivenim iz videozapisa snimljenog bespilotnom letjelicom i one određene primjenom akcelerometara iznosila je 3 %. Za određivanje vlastite frekvencije titranja kabela korišteni su harmonici viših frekvencija s ciljem smanjenja utjecaja vibracija letjelice u letu (odgovaraju nižim frekvencijama). Hoskere i ostali [21] odredili su modalne oblike i vlastite frekvencije mosta primjenom videozapisa snimljenog bespilotnom letjelicom. Razvijeni pristup testiran je u laboratoriju i u realnim uvjetima, a dobivene razlike u frekvencijama bile su oko 0,5 %. Usporedba određenih modalnih oblika provedena je primjenom kriterija modalne ortogonalnosti (MAC) koji poprima vrijednosti između 0 i 1 (vrijednost 1 označava savršeno preklapanje). Dobivena vrijednost iznosila je 0,996. Slične vrijednosti odstupanja dobivene su i prilikom mjerenja na stvarnoj konstrukciji mosta – MAC iznad 0,925 a razlike u frekvencijama manje od 1,6 %.

## 5 Zaključak

Razmatrane su različite mogućnosti primjene bespilotnih letjelica za prikupljanje relevantnih podataka za ocjenu stanja mostova. Zahtijevana razina detaljnosti, vrsta i karakter podataka koje želimo prikupiti uvelike diktira odabir sustava bespilotnih letjelica, pripadne opreme te plan i rizike vezane uz sam let. Važeća tehnička regulativa u Hrvatskoj propisuje sadržaj, obim i učestalost pregleda građevina. Trenutačna i praktična primjena bespilotnih letjelica u prvom redu moguća je za obavljanje vizualnih pregleda na razini osnovnog pregleda mosta kojeg je potrebno obavljati na godišnjoj (polugodišnjoj) razini. Prikupljeni podaci u obliku fotografija ili videozapisa dovoljne su kvalitete i mogu poslužiti inženjerima da iz njih prepoznaju veće nedostatke i oštećenja koji mogu ugroziti sigurnost korisnika građevine ili prouzročiti značajniju materijalnu štetu. Zbog različitog karaktera i prirode mogućih oštećenja i nedostataka na mostu, automatska detekcija u najvećoj mjeri moguća je samo za specifičnu vrstu oštećenja (npr. pukotine, ljuštenje, korozija) te može poslužiti kao pripomoć inženjerima prilikom pregleda.

Više razine pregleda, poput glavnog pregleda, zahtijevaju detaljniji pregled svih dijelova mosta. Fizički kontakt s konstrukcijom često je nužan radi otklanjanja nečistoća ili radi provođenja dodatnih ispitivanja (razornih ili nerazornih) kako bi se pouzdano odredilo stanje konstrukcije. Ograničenje bespilotnih letjelica isključivo na beskontaktnu metodu u tim okolnostima značajno smanjuje njihovu primjenjivost. Integra-

cija umjetne inteligencije i metoda računalnog vida u postupak obrade prikupljenih podataka može uvelike proširiti njihovu primjenu, a brojna provedena istraživanja dokazala su njihovu primjenjivost i za potrebe provođenja pojedinih statičkih i dinamičkih mjerenja. Razmatranje korištenja bespilotnih letjelice za monitoring mostova moguće je uz potpunu automatizaciju sustava za prikupljanje (autonomni let) i obradu podataka, s obzirom na to da monitoring podrazumijeva kontinuirano praćenje pojedinih parametara konstrukcije. Da bi korištenje bespilotnih letjelica postalo općeprihvaćeno za korištenje u svakodnevnoj praksi pregleda i praćenja stanja mostova, kroz buduća istraživanja potrebno je:

- riješiti probleme vezane uz trajanje leta (kapacitet baterije) i nosivost letjelice,
- smanjiti osjetljivost na vremenske utjecaje,
- osigurati upravljivost letjelicom i sigurnost leta prilikom gubitka signala, elektromagnetskih smetnji (čelični mostovi) te prisutnost prepreka – mogućnosti autonomnog leta,
- dokazati pouzdanost predloženih pristupa za različite tipove oštećenja i za različite tipove mostova,
- razviti prikladne metode obrade, pohrane i upravljanja velikom količinom prikupljenih podataka s ciljem osiguranja jednostavnosti korištenja, naknadnog pregleda te interpretacije prikupljenih podataka.

## Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je nastavno na projekt “Autonomni sustavi za pregled i predviđanje integriteta prometne infrastrukture - ASAP ” financiran sredstvima Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj. Također, autor zahvaljuje Hrvatskoj zakladi za znanost na podršci preko projekta “Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti” HRZZ DOK-2021-02.

## Literatura

- [1] Serdar, M., Damjanović, D., Švaco, M., Jerbić, B., Orsag, M., Kovačić, Z.: Razvoj autonomnog sustava za pregled i predviđanje integriteta građevina, GRAĐEVINAR 73 (2021) 12, pp. 1173–1184.
- [2] Mandić, A., Radić, J.: Prilog osuvremenjivanju propisa za opterećenja mostova, GRAĐEVINAR 56 (2003) 7, pp. 409-422.
- [3] Šavor, Z., Šavor Novak, M.: Postupci ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova, GRAĐEVINAR 67 (2015) 6, p.p. 557-572.
- [4] Tehnički propis za građevinske konstrukcije (Narodne novine, 17/2017).

- [5] Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (Narodne novine, 104/2018).
- [6] Dorafshan, S., Maguire, M.: Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation, *J. Civ. Struct. Heal. Monit* (2018), pp. 443–476.
- [7] Ereiz, S., Bartolac, M., Goričanec, J., Orsag, M.: Primjena bespilotnih letjelica u ocjeni stanja mostovne infrastrukture, *GRAĐEVINAR* 73 (2021) 11, pp. 1095–1106.
- [8] Unmanned Aerial Vehicle Bridge Inspection Demonstration Project, (Minnesota Department of Transportation) Minnesota, 2015.
- [9] HekmatiAthar, S., N. Goudarzi, N., Karimoddini, A., Homaifar, A., Divakaran, D.: A systematic evaluation and selection of UAS-enabled solutions for bridge inspection practices, *IEEE Aerospace Conference*, Montana, pp. 1–11, (2020).
- [10] Bolourian, N., Soltani, M. M., Albahri, A., Hammad, A.: High Level Framework for Bridge Inspection Using LiDAR-Equipped UAV, *34<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, (2017).
- [11] Spencer, B. F., Hoskere, V., Narazaki, Y.: Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring, *Engineering* (2019), pp. 199–222.
- [12] Dorafshan, S., Thomas, R. J., Maguire, M.: Benchmarking image processing algorithms for unmanned aerial system-assisted crack detection in concrete structures, *Infrastructures* 4 (2019) 2.
- [13] Dorafshan, S., Thomas, R. J., Coopmans, C., Maguire, M.: Deep Learning Neural Networks for sUAS-Assisted Structural Inspections: Feasibility and Application, *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Dallas, pp. 874–882, 2018.
- [14] Mac, V. H., Tran, Q. H., Huh, J., Doan, N. S., Kang, C., Han, D.: Detection of Delamination with Various Width-to-depth Ratios in Concrete Bridge Deck Using Passive IRT: Limits and Applicability, *Materials* 12 (2019) 23, pp. 3996.
- [15] Raja, B. N. K., Miramini, S., Duffield, C., Sofi, M., Zhang, L.: Infrared thermography detection of delamination in bottom of concrete bridge decks, *Structural Control and Health Monitoring* 29 (2022) 3.
- [16] Yoneyama, S., Kitagawa, A., Iwata, S., Tani, K., Kikuta, H.: Bridge deflection measurement using digital image correlation, *Experimental Techniques* 31 (2007) 1, pp. 34–40.
- [17] Reagan, D., Sabato, A., Niezrecki, C.: Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges, *Structural Health Monitoring* 17 (2018) 5, pp. 1056–1072.
- [18] Yoon, H., Shin, J., Spencer, B. F.: Structural Displacement Measurement Using an Unmanned Aerial System, *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 33 (2018) 3, pp. 183–192.



- [19] Marchewka, A., Ziółkowski, P., Aguilar-Vidal, V.: Framework for structural health monitoring of steel bridges by computer vision, *Sensors* 20 (2020) 3.
- [20] Tian, Y., Zhang, C., Jiang, S., Zhang, J., Duan, W.: Noncontact cable force estimation with unmanned aerial vehicle and computer vision, *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 36 (2021) 1, pp. 73–88.
- [21] Hoskere, V., Park, J.-W., Yoon, H., Spencer, B.F.: Vision-Based Modal Survey of Civil Infrastructure Using Unmanned Aerial Vehicles, *Journal of Structural Engineering* (2019), pp.1943-541

# Utjecaj zamjene cementa metakaolinom i vapnenačkim filerom na svojstva UHPC-a

**Antonija Očelić<sup>1</sup>**, doc. dr. sc. **Ana Baričević<sup>2</sup>**

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

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

## Sažetak

Zahtjev održivosti u građevinskoj industriji može ispuniti beton ultra visokih uporabnih svojstava (engl. UHPC). U radu je dan opći pregled UHPC-a uz provedena ispitivanja utjecaja silicijske prašine, metakaolina, vapnenačkog filera te nanogline na reološka i mehanička svojstva UHPC-a. Rezultati su pokazali sporiji prirast te manje vrijednosti ranih čvrstoća u odnosu na referentnu mješavinu. Istaknut je utjecaj nano gline na obradivost te potreba pronalaska optimalnog postupka miješanja i udjela nanogline.

*Ključne riječi: UHPC, održivi materijali, nanoglina, metakaolin, vapnenački filer, silicijska prašina*

## Influence of cement replacement by metakaolin and limestone filler on the properties of UHPC

### Abstract

The demand for sustainability in construction can be met by ultra-high performance concrete. The paper gives a general overview of UHPC and investigates the influence of silica fume, metakaolin, limestone filler and nanoclay on the rheological and mechanical properties of UHPC. The results showed a slower increase and lower early strengths compared to the reference mix. The influence of nanoclay on the workability of the mix and the need to find the optimum mixing procedure and content of nanoclay are highlighted.

*Key words: UHPC, sustainable materials, nano-clay, metakaolin, limestone filler, silica fume*

## 1 Uvod

Zadnjih godina se u području građevinskih materijala, uz postizanje odgovarajućih mehaničkih svojstava, sve veća važnost pridaje i zadovoljenju uvjeta ekološke i ekonomske učinkovitosti. Na taj način se, kako pri izgradnji novih, tako i pri obnovi postojećih građevina, nastoji zadovoljiti kriterij održivosti. Kao potencijalni materijal kojim bi se zadovoljili potrebni zahtjevi održivosti građevinskih materijala ističe se beton ultra visokih uporabnih svojstava (engl. ultra high performance concrete, UHPC). Izvanredna svojstva UHPC-a omogućuju njegovu raznovrsnu primjenu, kako u konstrukcijskim, tako i u nekonstrukcijskim namjenama. Konstrukcijsku primjenu našao je u izgradnji mostova i dijelova građevina zahvaljujući svojim svojstvima koja omogućuju proizvodnju manjih, lakših i tanjih presjeka, što ga čini učinkovitijim u odnosu na ostale cementne kompozite. Nekonstrukcijsku primjenu UHPC je našao kao sanacijski materijal, tj. za popravak završnih slojeva postojećih betonskih konstrukcija te na taj način poboljšavajući mehanička svojstva i svojstva trajnosti uz manje potrebnog održavanja [1]. Usprkos brojnim prednostima, UHPC, kao i svaki materijal, ima i nedostatke, a glavne čine: relativno visoka cijena, nedostatak odgovarajućih standarda, krhki slom, zahtjevan proces miješanja, visoko autogeno skupljanje te nedovoljno dugoročnih istraživanja o ponašanju UHPC-a u određenim uvjetima [2, 3]. Iako se UHPC, dugoročno gledano smatra ekološkim materijalom, istraživanjima se želi postići još veća ekološka učinkovitost te smanjiti njegova cijena [4]. Na taj način, pojedina istraživanja [4–11] daju prijedlog primjene zamjenskih cementnih materijala u sastavu UHPC-a, načina poboljšanja njegovih svojstava te načina smanjenja negativnog učinka na okoliš i postizanja održivog razvoja.

Cilj ovog rada je utvrditi utjecaj zamjenskih cementnih (metakaolina i vapnenačkog filera) i nano materijala (nanogline) na svojstva UHPC-a. Nano materijal je dodan s ciljem poboljšanja reoloških i mehaničkih svojstava UHPC-a. Kako je navedeno u [11], nanoglina potiče hidratacijske reakcije te poboljšava mikrostrukturu UHPC matrice, popunjavajući prostor između čestica cementa. Svi ti utjecaji dovode do poboljšanih reoloških svojstava mješavine, a time dovodeći i do poboljšanih mehaničkih svojstava. Cilj je postići ekološki i ekonomski učinkovitiji UHPC, što znači smanjenje udjela cementa uz zadržavanje odgovarajućih mehaničkih svojstava. Ova ispitivanja služe kao preliminarna, tj. za odabir matrice za daljnja, detaljnija ispitivanja te razvoj UHPC-a.

## 2 Općenito o betonu ultra visokih uporabnih svojstava

UHPC je beton visokih uporabnih svojstava tlačne čvrstoće veće od 100 MPa, vlačne veće od 15 MPa te time povećanih mehaničkih svojstava i superiorne trajnosti u odnosu na običan beton ( $\leq 60$  MPa) [12]. Iako je u nazivu ovog cementnog materijala

sadržana riječ beton, riječ je zapravo o mortu, a naziv beton dan je zbog prisustva čeličnih vlakana u uobičajenom sastavu [1]. Zbog prisutnosti vlakana, UHPC je moguće definirati i kao hibridni spoj tri tehnologije, tj. betona ojačanog vlaknima (engl. fibre reinforced concrete, FRC), betona visokih uporabnih svojstava (engl. high performance concrete, HPC) te samozbijajućeg betona (engl. self-compacting concrete, SCC) [5]. Stoga, riječ je o kombinaciji matrice visokih uporabnih svojstava te vlakana [6]. Osnovni principi za dobivanje betona ultra visokih uporabnih svojstava su smanjenje poroznosti, poboljšanje mikrostrukture i homogenosti te povećanje žilavosti [13]. Smanjenje poroznosti je razlog visokih svojstava trajnosti UHPC-a [3], a postiže se zgusnutim sastavom te smanjenjem vodocementnog omjera upotrebom superplastifikatora [13, 14]. Poboljšanje mikrostrukture postiže se tretmanima toplinom koji ubrzavaju pucolanske reakcije [1] te odgovarajućim granulometrijskim sastavom čestica, hidratacijskim i pucolanskim reakcijama i poboljšanjem zone sučeljka agregata i matrice [13]. Postizanje homogene strukture mješavine UHPC-a odnosi se na smanjenje veličine agregata, što će dovesti do smanjenja veličine pukotina, ali i učiniti zonu sučeljka sličnijom cementnoj matrici [13–15]. Dodatak vlakana u sastav predstavlja zadovoljenje četvrtog kriterija, tj. postizanje odlične žilavosti i otpornosti na udar te duktilnijeg ponašanja kompozita [13, 15]. Do danas je razvijeno nekoliko vrsta UHPC-a koje čine: ojačani kompaktni kompoziti (engl. compact reinforced composites, CRC), višerazinski cementni kompoziti (engl. multi-scale cement composites, MSCC), beton s reaktivnim prahom (engl. reactive powder concrete, RPC) te komercijalne vrste [1].

## 2.1 Sastav i faktori utjecaja

Glavni sastav UHPC-a čine: visokokvalitetan cement s dodatcima, koje većinom čini silicijska prašina, agregati te velike količine superplastifikatora s dodatkom vlakana [14]. Količina cementa pri tome može doseći 800 – 1000 kg/m<sup>3</sup>, što negativno utječe na okoliš, jer procijenjena emisija CO<sub>2</sub> pri proizvodnji cementa iznosi 7 % globalne emisije CO<sub>2</sub> [7]. Kako bi se smanjio udio cementa, u sastavu UHPC-a koriste se i zamjenski cementni materijali, među kojima bitan sastojak predstavlja silicijska prašina [7, 13]. Međutim, njena visoka cijena i ograničena dostupnost sprječavaju njenu širu primjenu, posebno u zemljama u razvoju [16]. Stoga, kako bi se postigla održivost UHPC-a, ističe se potreba za primjenom industrijskih otpadnih materijala, tj. povoljnijih alternativnih materijala kao zamjena za cement [6, 7]. Na taj način, zamjenske cementne materijale koji se koriste u sastavu UHPC-a, osim silicijske prašine, čine i: leteći pepeo, granulirana zgura visokih peći, rižine ljuske, metakaolin, vapnenački filer, prah čelične zgure, stakleni prah itd. [1, 11, 13, 14]. Uz cement i zamjenske materijale, vezivo čine i punila mikro i nano veličine, a neka od njih su kvarcni i vapnenački filer te nano-kalcijev karbonat i nanogлина [11]. Agregate većinom čine sitni agregati (prosječnog promjera od 1 mm do 4 mm) [17]

različitog porijekla, kao što su kvarcni pijesak, koji se zbog visoke cijene zamjenjuje riječnim pijeskom, pijeskom vapnenca, drobljenim bazaltom, recikliranim staklenim čahurama te ostatcima željezne rude [11, 13, 14]. Kako se UHPC odlikuje malim vodo-cementnim omjerom (0,15-0,25) [11], potrebna je upotreba superplastifikatora, među kojima su se polikarboksilati (PCs) pokazali najboljima te je zbog utjecaja na obradivost bitan redoslijed njihovog dodavanja [13].

Svojstva UHPC-a ovise o mnogim utjecajnim faktorima, među kojima su: vezivni materijal, agregati, gustoća mješavine, vlakna, veličina uzorka, vodo-cementni omjer, način njege, stupanj opterećenja [3, 14, 15]. Prema tome, u istraživanjima [16, 18–20] su ispitani neki od utjecaja te sve više istraživanja ide u smjeru primjene zamjenskih cementnih materijala zbog smanjenja negativnog učinka na okoliš. Način njege također ima značajan utjecaj na UHPC, ponajviše njegovu čvrstoću te je u [19] njega toplinom rezultirala ubrzanjem procesa hidratacije, povećanom gustoćom te time ultra visokom čvrstoćom, dok je u [16] njega autoklaviranjem pokazala najbolji utjecaj na rezultate čvrstoće. Iako je njega autoklaviranjem najbolja metoda po pitanju utjecaja na čvrstoću, standardna njega pri sobnoj temperaturi je ekonomski i ekološki učinkovitija [14]. Međutim, UHPC zadovoljavajućih svojstava se može proizvesti i pri normalnoj temperaturi njege [1], što je potvrđeno i u [21] gdje je istaknuta mogućnost proizvodnje UHPC-a, osim u tvornici, i na gradilištu. Za dobivanje UHPC-a odgovarajućih svojstava, potrebno je projektirati sastav odabirom materijala u optimalnim udjelima. Potrebno je postići zgusnuti sastav cementne matrice s dobrom obradivošću i čvrstoćom [1]. Također, projektiranje sastava treba biti ekonomski isplativo i održivo. Glavni parametri koje pri tome treba razmotriti su: optimiziranje granulometrijskog sastava, eliminacija krupnog agregata te odgovarajuća integracija vlakana [5].

### **3 Eksperimentalni dio**

#### **3.1 Materijali**

Za izradu mješavina upotrijebljeni su sljedeći cementni i zamjenski cementni materijali: cement CEM I 52,5 N, silicijska prašina Microsilica 920, metakaolin Metaver M, vapnenački filer Omyacarb te nano glina Cimsil A55 G. Agregat su činile 3 frakcije dolomita, tj. 0,1/0,6 mm, 0,6/1,25 mm, 1,25/2,00 mm (Samoborka) te kvarcni pijesak 0,1/1,0 mm. Za osiguranje potrebne obradivosti mješavine, upotrijebljen je polikarboksilatni superplastifikator Glenium ACE 430.

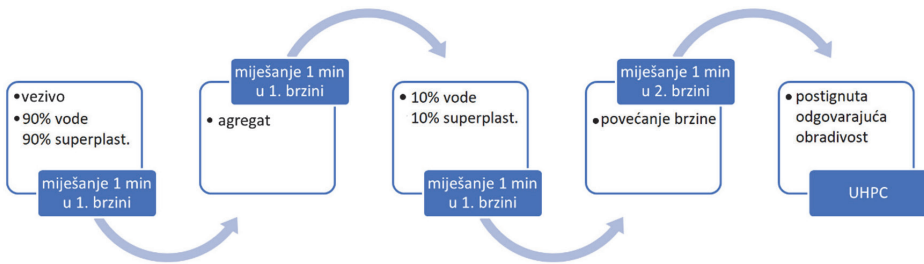
### 3.2 Sastav mješavina, priprema uzoraka i metode ispitivanja

Zamiješano je 7 mješavina UHPC-a, a sastav je dan u tablici 1. Sastav referentne mješavine preuzet je iz rada [22]. Za postizanje odgovarajuće obradivosti mješavina primijenjen je postupak dan na slici 1. Kao što je prikazano, ukupni postupak miješanja trajao je 4 minute, a podijeljen je u 4 dijela trajanja 1 minute. Navedeno vrijedi za prve tri mješavine, dok je za iduće četiri postupak malo modificiran na način da je ukupno trajanje produljeno za 30 do 60 sekundi, što je bilo potrebno za osiguranje odgovarajuće obradivosti nakon dodatka nanogline u navedenim mješavinama. Prva i druga brzina miješanja odnose se na brzine prema normi [23]. Oznake mješavina dane su prema zamjenskom pucolanskom materijalu i dodatku nano materijala. Na taj način, oznaka SF0,5NC znači da se radi o mješavini sa silicijskom prašinom te dodatkom nanogline u iznosu od 0,5 %, dok oznaka MK znači da se radi o mješavini s dodatkom metakaolina.

Svojstva svježeg morta ispitana su odmah nakon miješanja. Nakon ulijevanja morta u kalupe, uzorci su pokriveni folijom i čuvani u laboratorijskim uvjetima 24 sata do vađenja iz kalupa, kako bi se spriječilo isparavanje vode. Nakon raskalupljanja, uzorci su držani u komori na  $20 \pm 2$  °C i RH  $\geq 95$  %, do ispitivanja.

Tablica 1. Sastav mješavina

Komponente [kg/m <sup>3</sup> ]	Mješavina						
	REF	SF	MK	SF0,5NC	SF2NC	MK0,5NC	MK2NC
Cement	875	613	613	613	613	613	613
Silicijska prašina	44	44	-	43	41	-	-
Metakaolin	-	-	44	-	-	43	41
Vapnenački filer	-	263	263	259	247	259	247
Nano glina	-	-	-	4,6	18	4,6	18
v/v	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Voda	202	202	202	202	202	202	202
Superplastifikator	46	46	46	46	46	46	46
Kvarcni pijesak	219	219	219	219	219	219	219
Dolomit (0,1/0,6)	354	354	354	354	354	354	354
Dolomit (0,6/1,25)	382	382	382	382	382	382	382
Dolomit (1,25/2,00)	318	318	318	318	318	318	318



Slika 1. Postupak miješanja UHPC-a

Provedena su ispitivanja svojstava u svježem te očvrnulom stanju. Sve pojedinosti ispitivanja su dane u tablici 2.

Tablica 2. Provedena ispitivanja

Vrsta ispitivanja	Norma	Dimenzije uzorka [mm]	Broj uzoraka po mješavini
Konzistencija	HRN EN 1015-3:2000	/	1
Udio pora	HRN EN 1015-7:2000	/	1
Gustoća	HRN EN 1015-6:2000	/	1
Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje (1. dan)	HRN EN 1015-11:2019	40x40x160	3
Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje (7. dan)	HRN EN 1015-11:2019	40x40x160	3

## 4 Rezultati i diskusija

### 4.1 Svojstva u svježem stanju

U tablici 3 dani su rezultati svježih svojstava mješavina. Za prve tri mješavine konzistencija se nije mogla izmjeriti prema navedenoj metodi jer su mješavine imale svojstvo samozbijajućeg betona i svojim tečenjem su prešle granice kružne ploče na kojoj se ispitivanje provodi. S druge strane, dobivene gustoće su podjednake za sve mješavine, varirajući od 2,34 do 2,38 g/cm<sup>3</sup>. Mješavine s metakaolinom i silicijskom prašinom imaju udio pora podjednak onom referentne mješavine, što odgovara rezultatima drugih istraživanja, gdje je navedeno da njihov dodatak ne utječe na ukupni udio pora [24]. Međutim, za mješavine s dodatkom nanogline, uočene su gotovo dvostruko veće vrijednosti udjela pora u odnosu na referentnu mješavinu. Iako se u [25] navodi da dodatak nanogline povećava gustoću i smanjuje poroznost mješavine, u ovom slučaju bi razlog suprotnog učinka na poroznost mogao biti u procesu miješanja, tj. u [26, 27] se navodi važnost dobrog raspršivanja čestica na-

nogline, jer u protivnom dolazi do njihovog nakupljanja, što negativno utječe na svojstva mješavine. Dodatno, mješavine s dodatkom nanogline miješane su 30 do 60 sekundi duže u odnosu na referentnu mješavinu, a što je zasigurno doprinijelo većem udjelu zahvaćenog zraka. Unatoč navedenim razlikama, sve vrijednosti udjela pora se nalaze u rasponu od 0,3 % do 5,4 %, uobičajenom za UHPC [5].

**Tablica 3. Svojstva mješavina u svježem stanju**

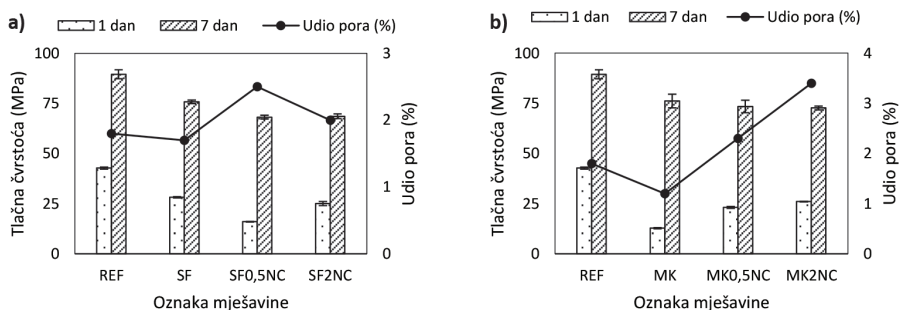
Mješavina	Konzistencija [mm]	Udio pora [%]	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	Temperatura [°C]
REF	/	1,8	2,38	26,7
SF	/	1,7	2,34	26
MK	/	1,2	2,37	27,3
SF0,5NC	275	2,5	2,35	27,2
SF2NC	230	2,0	2,34	26,8
MK0,5NC	250	2,3	2,36	27,2
MK2NC	224	3,4	2,35	27,4

## 4.2 Mehanička svojstva

Na slici 2 prikazane su vrijednosti tlačnih čvrstoća mješavina 1. i 7. dana. Sve mješavine bilježe pad tlačne čvrstoće i za 1. i za 7. dan starosti u odnosu na referentnu mješavinu. Smanjenje tlačnih čvrstoća svih mješavina može se pripisati dodatku vapnenačkog filera, gdje je u [28] za udio vapnenačkog filera od 25 % zabilježen pad tlačnih čvrstoća otprilike za 20 % za starosti 3 - 7 dana. Prirast tlačne čvrstoće zabilježen je za kasnije starosti, tj. 91. dan [28]. Za mješavine bez dodatka nanogline, pad tlačne čvrstoće se, zbog smanjenja udjela cementa u odnosu na referentnu mješavinu, može pripisati i samim zamjenskim cementnim materijalima, tj. silicijskoj prašini i metakaolinu. Naime, u [29] se navodi da dodatak silicijske prašine pokazuje poboljšanja tek nakon 7 dana starosti, odnosno s protekom vremena, dok je u [30] za metakaolin navedeno da smanjuje tlačnu čvrstoću 1. dana, a sveukupan povoljan učinak na tlačnu te čvrstoću na savijanje pokazuje tek nakon 14 dana starosti. Pad čvrstoće u ranijim starostima se za silicijsku prašinu pripisuje po prirodi sporijoj pucolanskoj reakciji [29], dok se u slučaju metakaolina utjecaj na tlačnu čvrstoću povezuje s tri učinka: punila, pucolanske reakcije i povećanja hidratacije cementa [31]. Pri tome se utjecaji punila i poticanja hidratacije cementa ostvaruju odmah, odnosno u prva 24 sata, dok pucolanska reakcije povećava tlačnu čvrstoću u razdoblju 7 do 14 dana od očvrnuća [31]. Također, utjecaj imaju i udjeli navedenih materijala, gdje se za silicijsku prašinu u [24] kao optimalan udio za tlačnu čvrstoću navodi udio od 8 %, dok je za metakaolin taj udio 10 %-20 % [32], odnosno 5 %-20 % u [30].

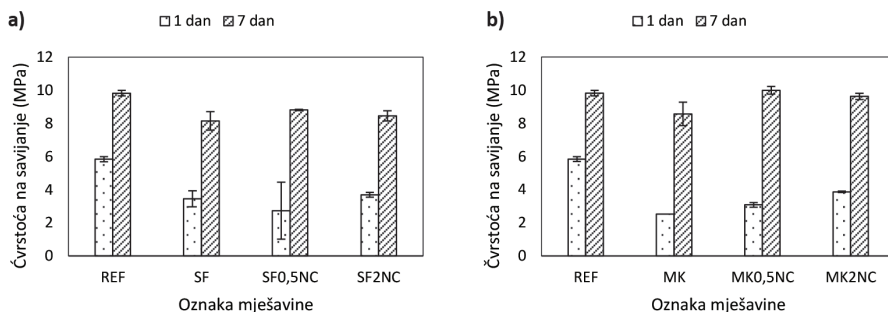


Mješavine s dodatkom nanogline i silicijskom prašinom, tj. SF0,5NC i SF2NC su pokazale značajna smanjenja tlačne čvrstoće 1. dana (-62,45 %, -41,36 %) u odnosu na mješavinu REF. S druge strane, dodatak nanogline metakaolinu, tj. MK0,5NC i MK2NC, je doprinio porastu tlačne čvrstoće 1. dana (+80,77 %, +103,67 %) u odnosu na mješavinu MK. Može se zaključiti da je kombinacija nanogline i metakaolina povoljnija nego ona nanogline i silicijske prašine, a razlog se možda može pronaći u sličnijem sastavu veličine čestica metakaolina i nanogline. Međutim, [33] navodi da za povoljno djelovanje na svojstva UHPC-a, nije važno jesu li nano i pucolanski materijal iste baze. U ovom ispitivanju to bi značilo da kombinacija silicijske prašine i nanogline ne bi trebala imati značajnijeg utjecaja na svojstva UHPC-a samo zbog svog međusobno različitog kemijskog sastava. Osim toga, navodi se da u slučaju silicijske prašine, dodatak nano materijala nema značajnijeg utjecaja zbog njene velike pucolanske reaktivnosti [33]. Također, iako neka istraživanja navode povoljan utjecaj nanogline na tlačnu čvrstoću UHPC-a, riječ je malim povećanjima, tj. dodatkom 1 % i 3 % nanogline zabilježeno je povećanje 1,3 % i 2,8 % za 7. dan starosti [34]. Očekivani doprinos nanogline za ovo svojstvo je u granicama standardne devijacije rezultata ispitivanja stoga ne čudi što ovim istraživanjem nije zabilježen pozitivan doprinos. Posebno uzimajući u obzir značajan porast udjela pora (1,9 i 2,8 puta) kod mješavina MK0,5NC i MK2NC u odnosu na MK, a što je imalo dominantan utjecaj na vrijednosti tlačne čvrstoće. U istraživanju je upotrijebljena sepiolitna vrsta nanogline, koja povećava viskoznost te svojom igličastom strukturom i većom apsorpcijom vode smanjuje učinkovitost superplastifikatora [35]. Navedene karakteristike utječu na obradivost, što je bio slučaj i u ovom istraživanju, gdje su mješavine s nanoglinom trebale dulje miješanje. Za razumijevanje djelovanja silicijske prašine, metakaolina i nanogline potrebno je detaljnije proučiti njihov granulometrijski i kemijski sastav, a koji bi mogli biti dodatni uzroci ostvarenih rezultata. Važno je uočiti kako su za dva različita udjela nanogline dobivene podjednake tlačne čvrstoće 7. dana starosti, nevezano radi li se o kombinaciji sa silicijskom prašinom ili metakaolinom.



Slika 2. Tlačna čvrstoća mješavina: a) sa silicijskom prašinom, b) s metakaolinom

Slika 3 prikazuje vrijednosti čvrstoće na savijanje mješavina 1. i 7. dana. Kao i kod tlačne čvrstoće, mješavine većinom bilježe pad čvrstoće u odnosu na referentnu, koji je posebno izražen za 1. dan. Smanjenje čvrstoće na savijanje u prvih 7 dana odgovara rezultatima dobivenim u [34]. Najveće smanjenje čvrstoće na savijanje 1. dana bilježe MK i SF0,5NC, dok se za 7. dan to odnosi na SF i SF2NC. Prema dobivenim rezultatima za 7. dan starosti, mješavina s metakaolinom je ostvarila veću čvrstoću na savijanje ( $8,57 \text{ N/mm}^2$ ) nego ona sa silicijskom prašinom ( $8,15 \text{ N/mm}^2$ ), dok je u slučaju 1. dana starosti situacija obrnuta, tj. dobivena je čvrstoća od  $3,45 \text{ N/mm}^2$  za silicijsku prašinu te  $2,53 \text{ N/mm}^2$  za metakaolin. Dodatak nanogline je u slučaju mješavine MK0,5NC čak doveo do povećanja čvrstoće na savijanje u odnosu na referentnu za 1,73 %. Međutim, sve ostvarene razlike između pojedinih mješavina u granicama su vrijednosti standardne devijacije i ne mogu se smatrati značajnima posebno uzimajući u obzir udio pora.



Slika 3. Čvrstoća na savijanje mješavina: a) sa silicijskom prašinom, b) s metakaolinom

## 5 Zaključak

Pregledom literature dan je prikaz osnovnih svojstava i utjecajnih faktora betona ultra visokih uporabnih svojstava, tj. UHPC-a. Ističe se kao materijal za zadovoljenje kriterija održivosti u području građevinske industrije te je moguće ostvariti veću ekološku i ekonomsku učinkovitost u odnosu na uobičajene cementne kompozite. U eksperimentalnom dijelu to se nastojalo potvrditi, tj. zamjenom cementa ekonomski (vapnenački filer) i ekološki (silicijska prašina/metakaolin) povoljnijim materijalima postići svojstva UHPC-a. Najbolje rezultate po pitanju tlačne čvrstoće pokazale su mješavine s metakaolinom i vapnenačkim filerom te njihova kombinacija s nanoglinom. Isto se može zaključiti i za čvrstoće na savijanje. Dodatak nanogline u mješavine utjecao je na obradivost iziskujući dulje vrijeme miješanja, što je dovelo do pojave većeg udjela pora u odnosu na mješavine bez nano gline. Dulje vrijeme miješanja i povećanje udjela pora odrazili su se i na smanjenje čvrstoća. U cilju jasnijeg razumijevanja doprinosa pojedinih zamjenskih materijala (silicijske prašine,

metakaolina i vapnenačkog filera) te nanogline potrebno je dodatno razmotriti njihov granulometrijski i kemijski sastav. Također, kako većina upotrijebljenih materijala pokazuje poboljšanje djelovanja s protekom vremena, za bolje razumijevanje i pojedine doprinose, potrebno je provesti ispitivanja za veće starosti UHPC-a. Za bolju inkorporaciju nanogline, potrebno je pronaći optimalan proces miješanja, kao i optimalan udio nanogline. Provedeno ispitivanje je služilo kao preliminarno za odabir materijala matrice za daljnja ispitivanja. Zaključno, daljnja istraživanja će ići u smjeru kombinacije metakaolina, vapnenačkog filera i nanogline uz određivanje optimalnih udjela i navedena potrebna poboljšanja.

## Zahvala

Provedeno istraživanje je dio projekta “Razvoj novih tehnologija i usluga u izvođenju specijalnih građevinskih radova” (K.K.01.2.1.02.0297), financiranog od Europskog fonda za regionalni razvoj.

## Literatura

- [1] Azmee, N.M., and Shafiq, N., “Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 9, 2018, doi: 10.1016/j.cscm.2018.e00197.
- [2] Vaitkevičius, V., Šerelis, E., Vaičiukynienė, D., Raudonis, V., and Rudžionis, Ž., “Advanced mechanical properties and frost damage resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 26–31, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.012.
- [3] Abbas, S., Nehdi, M. L. and Saleem, M. A., “Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 10, no. 3, pp. 271–295, 2016, doi: 10.1007/s40069-016-0157-4.
- [4] Ferdosian, I. and Camões, A., “Sustainable construction through eco-efficient ultra-high performance concrete,” *Struct. Archit. - Proc. 3rd Int. Conf. Struct. Archit. ICSA 2016*, no. July, pp. 789–797, 2016, doi: 10.1201/b20891-109.
- [5] Imam, A., Sharma, K.K., Kumar, V., and Singh, N., “A review study on sustainable development of ultra high-performance concr,” *AIMS Mater. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 9–35, 2022, doi: 10.3934/MATERSCI.2022002.
- [6] Yu, R., Song, Q., Wang, X., Zhang, Z., Shui, Z., and Brouwers, H. J. H., “Sustainable development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC): Towards to an optimized concrete matrix and efficient fibre application,” *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 220–233, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.017.

- [7] Hamad, M. A. et al., "Production of ultra-high-performance concrete with low energy consumption and carbon footprint using supplementary cementitious materials instead of silica fume: A review," *Energies*, vol. 14, no. 24, pp. 1–26, 2021, doi: 10.3390/en14248291.
- [8] Reda, M. M., Shrive, N. G., and Gillott, J. E., "Microstructural investigation of innovative UHPC," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 323–329, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00225-7.
- [9] Shi, Y., Long, G., Ma, C., Xie, Y., and He, J., "Design and preparation of ultra-high performance concrete with low environmental impact," *J. Clean. Prod.*, vol. 214, pp. 633–643, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.318.
- [10] Marvila, M. T., De Azevedo, A. R. G., De Matos, P. R., Monteiro, S. N., and Vieira, C. M. F., "Materials for production of high and ultra-high performance concrete: Review and perspective of possible novel materials," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 15, 2021, doi: 10.3390/ma14154304.
- [11] Du, J. et al., "New development of ultra-high-performance concrete (UHPC)," *Compos. Part B Eng.*, vol. 224, no. August, p. 109220, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109220.
- [12] Pernicova, R., Dobias, D., and Mandlík, T., "Mechanical properties of UHPC with different kinds of glass fibres," *Proc. Int. Conf. FIBRE Concr.*, vol. 2015-Janua, pp. 353–359, 2015.
- [13] Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., and Fang, Z., "A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 741–751, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.
- [14] Mishra, O., and Singh, S. P., "An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 8, no. 2, pp. 97–143, 2019, doi: 10.1080/21650373.2018.1564398.
- [15] Shweta Mishra, "Reviewing Some Properties of Ultra High Performance Concrete," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V9, no. 06, pp. 108–121, 2020, doi: 10.17577/ijertv9is060156.
- [16] Ahmed, S., Al-Dawood, Z., Abed, F., Mannan, M. A., and Al-Samarai, M., "Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete - A review," *J. Build. Eng.*, vol. 44, no. September, p. 103238, 2021, doi: 10.1016/j.jobte.2021.103238.
- [17] Micelli, F., Renni, A., Kandalajt, A. G., and Moro, S. Fiber-reinforced concrete and ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete materials. INC, 2020.
- [18] Alkaysi, M., and El-Tawil, S., "Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 49, no. 10, pp. 4185–4200, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0780-6.

- [19] Yoo, D. Y., and Banthia, N., "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 73, pp. 267–280, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001.
- [20] Duc Vinh Quang, N., Aleksandrova, O., and Samchenko, S., "Combined effect of mineral admixtures and fine aggregate on the mechanical properties of ultrahigh performance concrete," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 869, no. 3, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/869/3/032034.
- [21] Yang, S. L., Millard, S. G., Soutsos, M. N., Barnett, S. J., and Le, T. T., "Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2291–2298, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.11.012.
- [22] Yu, R., Spiesz, P., and Brouwers, H. J. H., "Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)," *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 29–39, 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.11.002.
- [23] "HRN\_EN\_196-1\_2016 (Metode ispitivanja cementa -- 1. dio: Određivanje čvrstoće)" .
- [24] Hassan, A. A. A., Lachemi, M., and Hossain, K. M. A., "Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 6, pp. 801–807, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013.
- [25] Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., and Low, I. M., "Effect of nanoclay on durability and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites," *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 5, no. 1, pp. 62–70, 2017, doi: 10.1016/j.jascer.2017.01.003.
- [26] Niu, X. J., Bin Li, Q., Hu, Y., Tan, Y. S., and Liu, C. F., "Properties of cement-based materials incorporating nano-clay and calcined nano-clay: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 284, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122820.
- [27] Hamed, N., El-Feky, M. S., Kohail, M., and Nasr, E. S. A. R., "Effect of nano-clay deagglomeration on mechanical properties of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 205, pp. 245–256, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.018.
- [28] Kang, S. H., Jeong, Y., Tan, K. H., and Moon, J., "High-volume use of limestone in ultra-high performance fiber-reinforced concrete for reducing cement content and autogenous shrinkage," *Constr. Build. Mater.*, vol. 213, pp. 292–305, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.091.
- [29] Barbhuiya, S., and Qureshi, M., "Effects of Silica Fume on the Strength and Durability Properties of Concrete," *Cesdoc*, no. December 2016, pp. 117–120, 2016.
- [30] Mo, Z., Wang, R., and Gao, X., "Hydration and mechanical properties of UHPC matrix containing limestone and different levels of metakaolin," *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 119454, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119454.

- [31] Anurag, Kumar, R., Goyal, S., and Srivastava, A., "A comprehensive study on the influence of supplementary cementitious materials on physico-mechanical, microstructural and durability properties of low carbon cement composites," *Powder Technol.*, vol. 394, pp. 645–668, 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.08.081.
- [32] Homayoonmehr, R., Ramezaniapour, A. A., and Mirdarsoltany, M., "Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review," *J. Build. Eng.*, vol. 44, no. April, p. 103011, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103011.
- [33] Alharbi, Y. R., Abadel, A. A., Mayhoub, O. A., and Kohail, M., "Effect of using available metakaoline and nano materials on the behavior of reactive powder concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 269, no. xxxx, p. 121344, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121344.
- [34] Mohamed, A. M., "Influence of nano materials on flexural behavior and compressive strength of concrete," *HBRC J.*, vol. 12, no. 2, pp. 212–225, 2016, doi: 10.1016/j.hbrj.2014.11.006.
- [35] Varela, H., Barluenga, G., and Palomar, I., "Influence of nanoclays on flowability and rheology of SCC pastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 243, p. 118285, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118285.



# Numeričko modeliranje posmične veze između čelika i betona kod spregnutih nosača izvedenih od hladno oblikovanih profila

Vlaho Žuvelek<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Ivan Ćurković<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

Spregnute međukatne konstrukcije od čelika i betona koje su izgrađene od hladno oblikovanih čeličnih nosača (HOP) i betonske ploče mogu pružiti značajne prednosti u odnosu na tradicionalna rješenja. Jedno od takvih inovativnih rješenja je predmet ovog rada koje se sastoji od HOP nosača izvedenih od HOP i valovitog hrpta sastavljenih uz pomoć točkastog zavarivanja te betonske ploče koja je s nosačem povezana s inovativnom posmičnom vezom. U nastavku rada će se predstaviti numeričko modeliranje dviju vrsta posmičnih veza koje su prikladne za spomenute spregnute sustave. Jedna vrsta veze sadrži vijke koji omogućavaju izravnu posmičnu vezu između pojasnice nosača i betonske ploče. Druga vrsta veze je ostvaren uz pomoć betonskih moždanika koji koriste valoviti hrbat nosača. Rezultati numeričke simulacije ukazuju da rješenje s vijcima osiguravaju veću krutost posmične veze pri čemu istovremeno dolazi do redukcije duktilnosti.

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

## Numerical study of shear connection in cold-formed steel-concrete composite beam

### Abstract

Composite systems made by combining cold-formed steel (CFS) and concrete can produce excellent properties compared to traditional solutions. One such innovative solution is the subject of this paper which consists of built-up CFS with corrugated web, connected by spot-welds and concrete slab with innovative type of shear connection. This paper presents numerical investigation of two types of shear connections suitable for the proposed composite solution. One type of shear connection is completed using bolts which provide a direct shear connection between the flange of CFS girder and the concrete slab. The second type of shear connection was completed using composite dowel rib connector. The results of FE simulations indicate that solution with bolts ensures higher stiffness of the shear connection, but in turn reduces its ductility.

*Key words: composite beam, cold-formed steel (CFS), spot-weld, composite dowel rib connector, demountable shear connector*



## 1 Uvod

Spregnuti sustavi međukatnih konstrukcija od čelika i betona su među najisplativijim konstrukcijskim sustavima za primjenu kod višekatnih građevina jer kombiniraju konstrukcijsku učinkovitost s brzinom gradnje. Dodatna optimizacija ovih sustava može se postići primjenom sastavljenih hladno oblikovanih profila (HOP), te inovativnim rješenjima posmičnih veza koji bi osigurali manji utrošak materijala, bržu proizvodnju, jeftiniju ugradnju, te mogućnost demontaže s ciljem ponovne uporabe ili recikliranja na kraju životnog vijeka.

Primjena HOP u spregnutim konstrukcijama izvedenim od čelika i betona može rezultirati mnogima prednostima ovisno o primjeni konstrukcijskih rješenja [1–4]. Takve prednosti se očituju u smanjenju visine ploče, slobode oblikovanja poprečnog presjeka i jednostavne prilagodbe nepravilnim tlocrtima, brzom i širokoj dostupnosti takvih profila zbog jednostavne tehnologije izrade, fleksibilnosti montaže na licu mjesta ili u radionici [5]. Međutim, zbog vitkosti presjeka HOP, imaju određena ograničenja kada je potrebno pokriti veće raspone jer to zahtijeva veće presjeke. Takva problematika se pak može izbjeći primjenom valovitog hrpta. Upotreba valovitih hrptova dozvoljava primjenu tanjih limova bez ukruta, što rezultira manjim troškovima materijala te procijenjenim uštedama od 10 - 30 % u usporedbi s uobičajenim limenim nosačima i više od 30 % u usporedbi sa standardnim vruće valjanim nosačima. Na primjer, otpornost na izvijanje sinusoidalnog valovitog lima debljine 1 mm usporediva je s otpornošću ravnog hrpta debljine najmanje 12 mm [6]. Nadalje, nosači s valovitim hrptom uobičajeno koriste ravne ploče kao pojasnice nosača što zahtijeva posebne tehnike zavarivanja kako bi ih se zavarilo za valoviti hrpat i samim time uzrokuje brojne poteškoće [7]. Umjesto ravnih ploča predlaže se primjena HOP koji dozvoljavaju različite načine spajanja kao npr. vijcima, točkastim zavarima i tehnikom hladnog prijenosa metala, koji su istraženi u [8-10], utvrđeno je da povezivanje točkastim zavarivanjem ima najpovoljniju otpornost [11]. Ovako sastavljeni HOP nosači s valovitim hrptom, koristeći točkasto zavarivanje, rezultiraju odličnom duktilnošću i nosivosti, pri čemu također, točkasto zavareni nosači pokazuju veću krutost i nosivost u odnosu na nosače kod kojih se koriste samobušajući vijci [12, 13]. Drugi važan razlog primjene tehnike točkastog zavarivanja je da takvo rješenje omogućuje standardizaciju detalja u projektiranju i izvedbi, dozvoljava automatizaciju procesa proizvodnje što zauzvrat može povećati brzinu izrade sastavljenih HOP elemenata s valovitim hrptovima [6]. Još jedna bitna komponenta, pogotovo kada se razmatra spregnute nosače je posmična veza koja omogućuje interakciju između materijala i uvelike može utjecati na ukupno ponašanje sustava. Ponašanje same posmične veze ovisi o njezinoj čvrstoći, tj. o stupnju posmične veze koji se može definirati kao omjer posmične otpornosti spojnih sredstava u odnosu na otpornost najslabije komponente spregnutog presjeka (u ovom slučaju čelične grede

ili betonske ploče). Najčešća vrsta posmične veze koja se danas koristi ostvaruje se korištenjem zavarenih moždanika s glavom, koji predstavljaju jedinu posmičnu vezu koja je standardizirana unutar europskih normi [14]. Međutim, u posljednje vrijeme naglasak se stavlja na rješenja posmičnih veza koja omogućuju demontažu konstrukcijskog sustava u slučaju potrebe za modifikacijom, popravkom ili rekonstrukcijom. Detaljan pregled korištenih posmičnih veza koje omogućuju demontažu spregnutog sustava nedavno je prikazan u radu [15]. Na osnovi tog rada, zaključeno je da postoje veliki problemi vezani za otpornost i duktilnost različitih demontažnih posmičnih veza te da su potrebna daljnja istraživanja istih. Lakkavali i Liu [16] proučavali su četiri rješenja za prijenos posmične sile između HOP i betona među kojima su veze ostvarene preko kontaktnih ploha, unaprijed savijenih dijelova profila, pret hodno izbušenih rupa u profilima i samobušećim vijcima. Uzorci koji su sadržavali savijene dijelove pojasnice, pokazali su se kao najbolje rješenje, ostvarujući najveću otpornost i najmanje progibe u pogledu upotrebljivosti, dok su rješenja koja koriste vezu preko kontaktnih ploha rezultirala najnižom otpornosti i krutosti. Bamaga i dr. [17] nedavno su predložili i istražili tri različita rješenja demontažne posmične veze, koristeći posmične veze ostvarene uz pomoć valjane čelične ploče, jednostrukog ili dvostrukog profila koji su vijcima povezani za nosač. Rezultati ovog istraživanja dokazali su da sva tri predložena rješenja posmične veze imaju odgovarajuće otpornost kao i duktilno ponašanje. Osim prikazanih točkastih tipova posmičnih veza, istražena su rješenja kontinuirane posmične veze u obliku betonskih moždanika, koji također predstavljaju inovativno i obećavajuće rješenje posmične veze [18]. Iz svega navedenog očito je da još uvijek nedostaju potpuni podaci o cjelokupnom ponašanju HOP-a u spregnutim sustavima kao i nedostaci vezani za izvedbu posmične veze koje je također potrebno dodatno istražiti. Iz tog razloga, uspostavljen je istraživački projekt LWT-FLOOR kojem je cilj u prvoj fazi pronaći adekvatnu posmičnu vezu. U ovom radu, numerički su istražene dvije predložene posmične veze čiji će rezultati služiti kao podloga za daljnja eksperimentalna ispitivanja.

## 2 Numerički modeli

### 2.1 Vrsta i geometrija modela

Uz pomoć računalnog programa ABAQUS/CAE, razvijeni su trodimenzionalni modeli koji će biti korišteni u eksperimentalnom ispitivanju, tj. *push-out* testu. Kako bi se ostvarila uspješna konvergencija, zbog same složenosti modela korišten je ABAQUS Explicit [19]. Modeli s vijčanom posmičnom vezom (Slika 1. a-b) postignuti su primjenom vijaka s ugrađenom maticom u betonskoj ploči. Upotrebom ovakve posmične veze omogućuje se kontroliranje rotacije vijka i njegovog pomaka za vrijeme opterećivanja, te se omogućava veća krutost veze u odnosu na vijke bez ugrađene

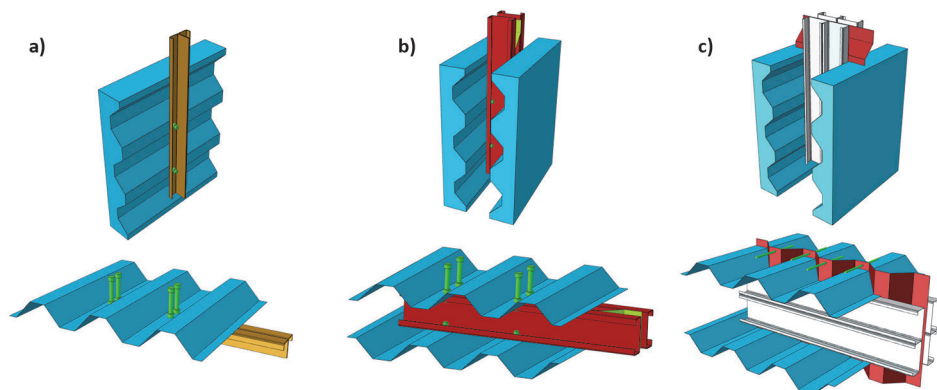
matice [15]. Vijci su postavljeni kroz prethodno izbušene rupe u profiliranom čeličnom limu betonske ploče i HOP profilima. Kod ove vrste posmične veze korišteni su vijci promjera 12 i 16 mm. Vijci koji su korišteni u modelima imaju reducirani radijus vijka na mjestu navoja između matica čiji radijus iznosi 10,4 mm za M12 i 14,1 mm za M16. Reducirani radijus je proračunat iz površine jezgre vijka [20]. Vijci M16 su primijenjeni kako bi se zadovoljio uvjet minimalnog promjera moždanika koji je propisan EN-1994-1 [14]. S druge strane, M12 vijci su uzeti u obzir kao konstruktivni vijci s najmanjim promjerom sukladno [21]. Za kvalitetu vijaka odabrana je kvaliteta 8.8 kao jedna od najčešće korištenih kvaliteta za konstrukcijske vijke. Kod takve posmične veze potrebno je zadovoljiti uvjet za visinu vijka u betonu koji je propisan EN-1994-1-1 [14], a navodi da nominalna visina vijka ne smije biti manja od 2d iznad vrha profiliranog lima betonske ploče. Sukladno tome ukupna visina vijka u betonu iznosi 95 mm. Kod prve posmične veze, promatran je i sustav koji je sastavljen od HOP *back-to-back* načinom bez valovitog hrpta (slika 1.a) kako bi se usporedile otpornosti s modelom koji sadrži valoviti hrpat (slika 1.b). Modeli s betonskim moždanicama kao inovativnom posmičnom vezom ostvareni su uz pomoć valovitog hrpa koji ima ulogu betonskog moždanika. U ovom slučaju valoviti hrpat koji tvori sastavljeni nosač s HOP profilima je propušten, te je ugrađen u betonsku ploču (slika 1.c). Kod ovakve posmične veze, prijenos posmične sile indirektno je ostvaren s betona u valoviti hrpat od kuda se dalje prenosi u HOP profile. Iz tog su razloga varirane dvije različite debljine valovitog hrpta. Dodatno su kroz rupe u valovitom hrptu u betonskoj ploči postavljene armaturne čelične šipke promjera 8 mm i duljine 220 mm. Valoviti hrpat je povezan s HOP C profilima uz pomoć točkastih zavara. Sukladno planiranim eksperimentalnim ispitivanjima, korištena su tri točkasta zavara na kontaktnim površinama valovitog hrpta i HOP C profila. Obzirom da podaci eksperimentalnog ispitivanja točkastih zavara još nisu dostupni, isti su u modelima definirani kao krute točke kako bi se izbjeglo neželjeno ponašanje ili otkazivanje.

Tablica 1. prikazuje 20 različitih modela koji su razmatrani u ovom radu. Kod modela s vijčanom posmičnom vezom varirana je debljina HOP-a (2,5 i 3 mm), kvaliteta čelika (DX51d i S350GD) i promjer vijka (M12 i M16). Modeli koji sadrže oznaku 'W' predstavljaju modele s valovitim hrptom između HOP-a (slika 1.b), dok oni bez takve oznake predstavljaju modele gdje su HOP izravno spojeni *back-to-back* načinom (slika 1.a). Također, za drugu posmičnu vezu napravljena je parametarska analiza gdje je varirana debljina valovitog hrpta (0,8 i 1,5 mm) i vrsta betona (obični NC20/25 i lakoagregatni LC20/22 beton). Geometrija svih modela usvojena je sukladno nominalnoj geometriji uzoraka za buduća eksperimentalna ispitivanja (tablica 1.). Betonska ploča armirana je armaturnom mrežom Q524.

Tablica 1. Geometrijske karakteristike uzoraka *push-out* ispitivanja

Naziv modela	Kvaliteta čelika	HOP profil [mm]	Valoviti hrbat [mm]	Vijci	Razred betona	Betonska ploča [mm]	Profilirani lim [mm]
S1/S1W	DX51d	120x47x2.5	780x120x1.25	M12	C20/25	720x600x120	720x600x1.0
S2/S2W	S350GD			M12			
S3/S3W	DX51d			M16			
S4/S4W	S350GD			M16			
D1/D1W	DX51d	120x47x3.0	780x120x1.25	M12			
D2/D2W	S350GD			M12			
D3/D3W	DX51d			M16			
D4/D4W	S350GD			M16			
C1	DX51d	120x47x2.0	780x420x0.8	-	C20/25		
C2	DX51d		780x420x0.8	-	LC20/22		
C3	DX51d		780x420x1.5	-	C20/25		
C4	DX51d		780x420x1.5	-	LC20/22		

Simetrični uvjeti oslanjanja su jedino bili primjenjivi na modele prikazane na slici 1. a). Kod modela s vijčanom posmičnom vezom, primijenjeni su volumni konačni elementi (C3D8) za HOP nosače, betonsku ploču i vijke. Međutim, profilirani lim i valoviti hrbat su modelirani s plošnim konačnim elementima (S4R). U modelima s betonskim moždanicima svi elementi su modelirani s plošnim konačnim elementima, izuzev betonske ploče koja je modelirana s volumnim konačnim elementima. Armaturne šipke u betonskoj ploči modelirane su sa štapnim konačnim elementima (T3D2), dok su armaturne šipke koje su provučene kroz valoviti hrbat modelirane uz pomoć štapnih konačnih elementa (B31). U svrhu optimiziranja vremena provedbe numeričke simulacije, uz istovremeno zadržavanje visoke točnosti rezultata, bilo je potrebno formirati mrežu s pravilnim konačnim elementima.



Slika 1. Numerički modeli: posmična veza s vijcima – a) bez valovitog hrpta, b) s valovitim hrptom; c) posmična veza s betonskim moždanicom

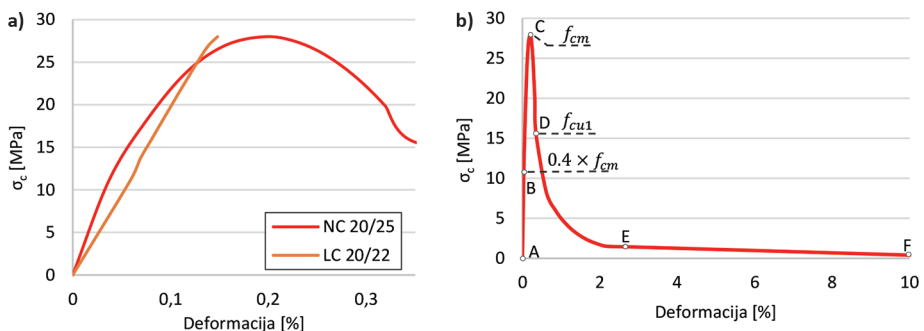
## 2.2 Materijalne karakteristike

### 2.2.1 Čelik

Radni dijagram čelika predstavljen je uz pomoć bilinearne krivulje sukladno EN 1993-1-5, Annex C [22]. Za sve čelične elemente u modelima primijenjen je modul elastičnosti od 210 GPa, Poisson-ov broj od 0,3 i gustoća čelika od 7850 kg/m<sup>3</sup>. Za hladno oblikovani čelik kvalitete DX51d, granica popuštanja i čvrstoća usvojene su s vrijednostima 270 MPa i 325 MPa, dok su za čelik S350GD te vrijednosti iznosile 350 MPa i 420 MPa. Kao što je prethodno navedeno, modeli sadrže i vijke kvalitete 8,8 za koje su uzete nominalne vrijednosti granice popuštanja i čvrstoće od 640 MPa i 800 MPa. Za armaturnu mrežu i šipke granica popuštanja definirana je s vrijednosti 500 MPa.

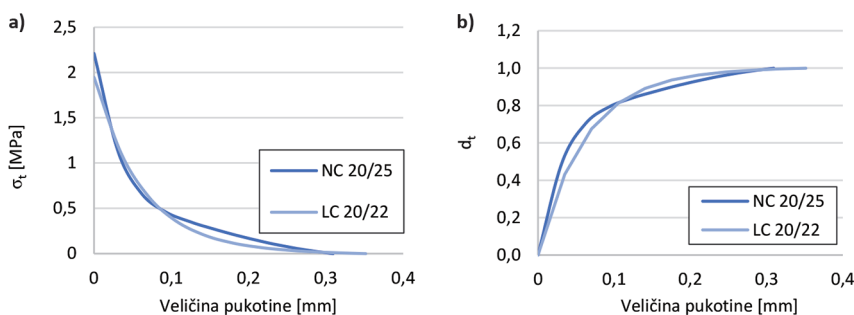
### 2.2.2 Beton

U svrhu simuliranja stvarnog ponašanja armirano betonske ploče korišten je takozvani *concrete damaged plasticity model* (CDP). Ovakav model zasnovan je na dva glavna mehanizma otkazivanja betona tj. raspucavanje u vlaknu i drobljenje u tlaku. Za CDP je potrebno definirati pojedine parametre, pri čemu su preuzete vrijednosti iz rada [23] uz iznimku kuta dilatacije od 31° prema [24], dok su svi ostali parametri uzeti sa zadanim vrijednostima danima u Abaqus-u [19]. Parametre koje je potrebno zadati za *concrete compression damage* i *concrete tension damage* proračunati su prema izrazima danima u [24]. Na osnovi tih izraza, na slici 2.a prikazan je radni dijagram betona prema EN 1992-1-1 [25]. Obzirom da se očekuje značajno drobljenje betona oko posmične veze, ponašanje betona u tlaku puno je točnije definirati prema odnosu naprezanje-deformacija prikazanom na slici 2.b danom u radu [26]. Takav odnos korišten je u numeričkim modelima ovog rada, zbog toga što krivulja propisana Eurocodom ne uzima u obzir ponašanje betona do potpunog drobljenja posebice za lakoagregatni beton.



Slika 2. Radni dijagrami za beton: a) prema EN 1992-1-1; b) proširenje krivulje prema [24]

Vlačno ponašanje betona je definirano uz pomoć izraza danih u [23]. Na osnovi dobivenih podataka, na slici 3. prikazan je razvoj vlačnih napreznja,  $\sigma_t$  i degradacije krutosti,  $d_t$  u odnosu na veličinu pukotine. Za određivanje svih potrebnih parametara korištene su gustoće od  $2400 \text{ kg/m}^3$  za obični beton i  $1750 \text{ kg/m}^3$  za lakoagregatni beton.



Slika 3. Vlačno ponašanje betona

### 2.3 Kontakti, rubni uvjeti i unos opterećenja

Potrebno je definirati kontakte koji utječu na ponašanje modela kako bi se ostvarila što bolja točnost rezultata u usporedbi sa eksperimentalnim istraživanjem. Ponašanje između pojedinih elemenata posmične veze ostvareno je korištenjem takozvane *surface-to-surface* opcije i *general contact* opcije u Abaqus softwaru [19]. Karakteristike ponašanja kontaktnih površina sadrže normalno i tangencijalno ponašanje uz pomoć kojih se onda pravilno prenose vertikalne i horizontalne sile između kontaktnih površina. Kod normalnog ponašanja onemogućeno je međusobno prodiranje jednog elementa u drugi, dok tangencijalno ponašanje omogućuje trenje između pojedinih elemenata koje je definirano uz pomoć koeficijenta trenja. U numeričkim modelima ovog rada, koeficijent trenja usvojen je s vrijednošću 0,3. Ovakve karakteristike ponašanja kontakta definirane su između površina HOP C profila, vijka, valovitog hrpta, profiliranog lima i betonske ploče. Armaturna mreža i šipke modelirani su tako da su ugrađeni u betonsku ploču pomoću opcije *embed*. U numeričkim modelima točkasti zavari su modelirani kao krute točke kako bi se spriječilo neželjeno ponašanje, tj. njihovo otkazivanje.

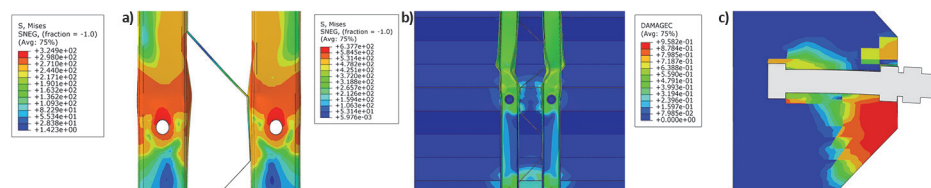
Jednoliki pomak u vertikalnom smjeru (Y smjeru) zadan je u vrhu HOP nosača. Kod modela s vijčanom posmičnom vezom iznos vertikalnog pomaka iznosi -10 mm, dok kod modela s betonskim moždanicima iznosi -30 mm. Na osnovi vrijednosti tih pomaka usklađena je brzina nanošenja pomaka u modelima. Kao što je ranije spomenuto, primijenjeni su simetrični rubni uvjeti na sredini svakog HOP C profila kod modela bez valovitog hrpta. Oslanjanje uzoraka ostvaruje se preko donjih ploha betonskih ploča gdje su te ravnine modelirane kao oslonac sa spriječenim pomaci-

ma u svim smjerovima. Dodatno na mjestu unosa pomaka, onemogućena je rotacija oko x i z osi te translacija u x i z smjeru kako bi se izbjeglo neželjeno ponašanje na mjestu unosa opterećenja.

### 3 Rezultati numeričkih modela

#### 3.1 Modeli s vijčanom posmičnom vezom

Unutar dobivenih rezultata, uočena su tri moda otkazivanja koja su prikazana na slici 4. Prvi mod otkazivanja očituje se u obliku izduženja rupe na HOP C profilu nakon dostizanja otpornosti po omotaču rupe. Drugi mod otkazivanja odnosi se na gubitak stabilnosti HOP C profila koji se očituje brзом promjenom krutosti i naglim smanjenjem otpornosti nakon dosezanja krajnje čvrstoće. Treći mod otkazivanja je otkazivanje betona gdje dolazi do drobljenja betona i stvaranja pukotina oko posmičnog spojnog sredstva, što također može izazvati nagli pad krutosti i otpornosti dobivenih rezultata.



Slika 4. Tri moda otkazivanja: a) otpornost po omotaču rupe; b) gubitak stabilnosti HOP profila; c) otkazivanje betona (drobljenje betona)

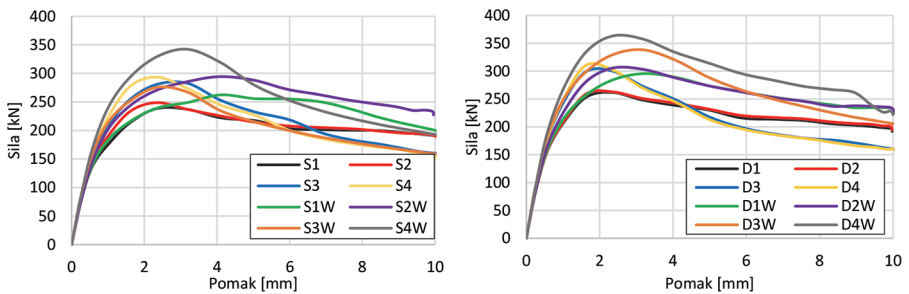
Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s karakterističnim vrijednostima koje se mogu izračunati pomoću izraza danih u Eurocode-u, bilo EN 1993-1-8 [27] ili EN 1994-1-1 [14]. Izračunate karakteristične vrijednosti uključuju otpornost po omotaču rupe HOP profila ( $F_{b,Rk}$ ), otpornost poprečnog presjeka HOP profila ( $N_{Rk}$ ) i otpornost posmične veze u čeliku ( $P_{Rk,S}$ ) ili u betonu ( $P_{Rk,C}$ ) s faktorom i bez faktora redukcije,  $k_t$ . Naime, zbog postavljanja rebara betonske ploče okomito na HOP profil, otpornost posmične veze može se dodatno smanjiti primjenom faktora redukcije  $k_t$ . Za odabranu geometriju profiliranog lima betonske ploče, faktor redukcije iznosi 0,58, što je manje od gornje granične vrijednosti od 0,7 predviđene EN 1994-1-1 [14]. Ove izračunate vrijednosti prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Karakteristične vrijednosti otpornosti u kN prema Eurocode-u za različite modele

Naziv modela	$F_{b,Rk}$	$N_{Rk}$	$P_{Rk,S}$	$k_t \cdot P_{Rk,S}$	$P_{Rk,C}$	$k_t \cdot P_{Rk,C}$
S1/S1W	21,1	144	54,4	31,6	32,3	18,7
S2/S2W	27,3	186	54,4	31,6	32,3	18,7
S3/S3W	28,6	144	100	58	57,5	33,4
S4/S4W	37	186	100	58	57,5	33,4
D1/D1W	25,4	181	54,4	31,6	32,3	18,7
D2/D2W	32,8	235	54,4	31,6	32,3	18,7
D3/D3W	34,4	181	100	58	57,5	33,4
D4/D4W	44,4	235	100	58	57,5	33,4

Proračunate vrijednosti uspoređene su s numeričkim rezultatima u tablici 3, gdje je za usporedbu vrijednosti iz tablice 2 potrebno pomnožiti s osam, izuzev vrijednosti  $N_{Rk}$  koju je potrebno pomnožiti s dva. Numerički dobiveni odnos sile i pomaka HOP profila za S/SW i D/DW modele, koji razmatraju HOP profile debljine 2,5 i 3 mm, prikazan je na slici 5. Krivulje dobivene za S modele ukazuju na isti mod otkazivanja. Kod svih modela došlo je do otkazivanja posmične veze u betonu, iako analitički rezultati iz tablice 2 mogu ukazivati da je u pojedinim modelima došlo do otkazivanja po omotaču rupe. Međutim, kada se detaljno istraže modeli, vidi se da nije došlo do otkazivanja po omotaču rupe što se može opravdati očekivanom situacijom gdje analitički modeli daju manju otpornost od stvarne i/ili numeričke vrijednosti otpornosti. Također, da se radi o istom modu otkazivanja, tj. o otkazivanju posmične veze preko betona, može se zaključiti iz činjenice da su sve vrijednosti otpornosti kod S modela, koji su nominalno isti izuzev povećane čvrstoće čelika HOP za 30 %, vrlo bliske. S druge strane, krivulje dobivene za SW modele ukazuju na postojanje različitih modova otkazivanja. S1W pokazuje da je dosegnuta krajnja čvrstoća nakon čega sila opada. Kada se model detaljno istraži, može se vidjeti da su rupe za vijke dosegle otpornost po omotaču rupe, te su se izdužile što je u konačnici rezultiralo gubitkom stabilnosti HOP profila na što ukazuje brzo smanjenje otpornosti na kraju. Pri tome kod ovog uzorka istovremeno dolazi do mjestimičnog drobljenja betona, međutim nije nastupilo otkazivanje posmične veze u betonu. Kod modela S2W nakon dosezanja otpornosti dolazi do polaganog pada sile, te uvid u model pokazuje da je došlo do otkazivanja betona, bez gubitka stabilnosti profila, iako su, slično kao i kod S uzoraka, analitičke vrijednosti otpornosti po omotaču rupe i vrijednosti otkazivanja posmične veze preko betona bliske. Rezultati modela S3W i S4W pokazuju naglo smanjenje otpornosti nakon dosezanja krajnje čvrstoće što upućuje na činjenicu da je došlo do gubitka stabilnosti HOP-a, što se ujedno vidi i pregledom samih modela, iako je ponovno analitički izračunata otpornost po omotaču rupe nešto niža od tlačne otpornosti HOP-a na razini presjeka.





Slika 5. Odnos sile i pomak

Krivulje sila-pomak dobivene za D i DW modele ukazuju na mod otkazivanja kao i kod S modela tj. dolazi do otkazivanja posmične veze preko betona. Nadalje, kada se odgovarajući modeli detaljno istraže, može se potvrditi da kod nijednog modela nije došlo do otkazivanja zbog doseganja otpornosti po omotaču rupe, iako rezultati u tablici 2. mogu ukazivati drugačije. Ponovno, kao i kod S modela, dobivene vrijednosti otpornosti D i DW modela vrlo su bliske unatoč različitoj kvaliteti čeličnog materijala, što upućuje na jedan mod otkazivanja tj. otkazivanje preko betona. Uvidom u modele D3W uočen je gubitak stabilnosti što je vidljivo i po obliku krivulje u usporedbi s krivuljom modela D4W. Za razliku od toga, model D4W ne pokazuje nikakav gubitak stabilnosti te je u tom slučaju došlo do isključivog otkazivanja betona, što je očekivano prema vrijednostima u tablici 2.

Tablica 3. Usporedba numeričkih i analitičkih vrijednosti za odabrane modove otkazivanja u kN

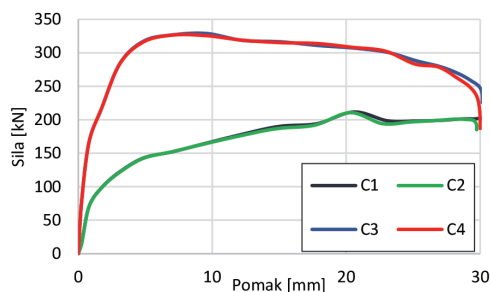
Naziv modela	Mod otkazivanja	Naziv modela	Mod otkazivanja	$F_{NUM}$	$F_{CALC}$	$F_{CALC}/F_{NUM}$	$k_t \cdot F_{CALC}$	$k_t \cdot F_{CALC}/F_{NUM}$
S1	Beton	S1W	Stabilnost	240 263	259 288	1,08 1,09	150 -	0,63 -
S2	Beton	S2W	Beton	250 294	259 259	1,04 0,88	150 150	0,6 0,51
S3	Beton	S3W	Stabilnost	284 276	460 288	1,62 1,04	267 -	0,93 -
S4	Beton	S4W	Stabilnost	294 343	460 372	1,56 1,08	267 -	0,91 -
D1	Beton	D1W	Beton	262 296	259 259	0,99 0,87	150 150	0,57 0,51
D2	Beton	D2W	Beton	264 303	259 259	0,98 0,85	150 150	0,57 0,50
D3	Beton	D3W	Stabilnost	300 339	460 362	1,53 1,07	267 -	0,89 -
D4	Beton	D4W	Beton	310 358	460 460	1,48 1,28	267 267	0,86 0,75

Dobiveni rezultati upućuju na to da se kod modela s manjim promjerom vijka faktor redukcije može potpuno izostaviti ili primijeniti s modificiranim vrijednostima, dok se za veće promjere vijaka isti mora uzeti u obzir. Također, rezultati upućuju na to da su predložene vrijednosti faktora redukcije dane u EN 1994-1-1 [14] previše konzervativne, ali i na to da je njegova primjena upitna obzirom da su materijal kao i promjer korištenih vijaka u analiziranim modelima izvan predloženog opsega danog u normi. Konačno, rezultati jasno pokazuju da razmak spojnih sredstava kojima se

formira posmična veza značajno utječe na način otkazivanja sustava, te ukoliko je razmak nedovoljan otkazivanje posmične veze će uvijek nastupiti preko betona.

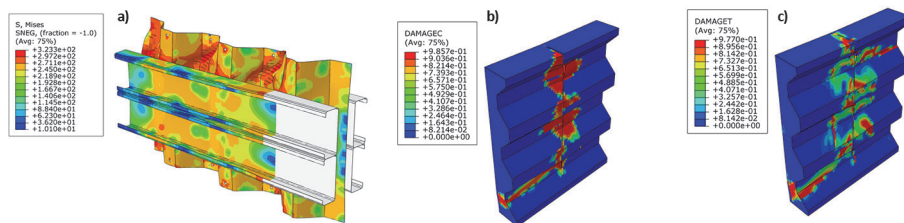
### 3.2 Modeli posmične veze s betonskim moždanicima

Numerički rezultati dobiveni za C modele prikazani su na slici 6, gdje je dan odnos sile i pomaka.



Slika 6. Odnos sile i pomaka

Dobiveni rezultati pokazuju dva različita moda otkazivanja, tj. popuštanje valovitog hrpta pri posmiku kroz formiranje vlačnog polja (slika 7. a) i mješoviti mod popuštanja valovitog hrpta i otkazivanja betona (slike 7.a do 7.c). Prvi mod otkazivanja dobiva se za uzorke koji za valoviti hrbat koriste limove debljine 0,8 mm. U ovom slučaju dobivene krivulje za uzorke C1 i C2 ne pokazuju smanjenje otpornosti jer otkazivanje čelika nije eksplicitno definirano u numeričkim modelima. Međutim, za modele C3 i C4 krivulje, nakon dosezanja krajnje otpornosti, polagano padaju. To je zbog činjenice da se kod ovih modela koristio deblji lim za valoviti hrbat (1,5 mm), te je kod njih osim posmičnog otkazivanja valovitog hrpta došlo i do otkazivanja betona.



Slika 7. Modovi otkazivanja za C modele: a) posmično otkazivanje valovitog hrpta; b) otkazivanje betona (drobljenje betona); c) otkazivanje betona (vlačne pukotine)

## 4 Zaključak

U ovom istraživanju simulirano je dvadeset *push-out* testova kako bi se dobili rezultati potrebni za provođenje stvarnih eksperimentalnih ispitivanja. Dobiveni rezultati daju sljedeće zaključke koje je potrebno dodatno potvrditi eksperimentalno dobivenim rezultatima.

- Posmična veza ostvorena pomoću vijaka pokazuje veću krutost i veću čvrstoću, međutim, manje je duktilna.
- Rezultati pokazuju da bi se faktor redukcije  $k_t$  mogao povećati, dok bi se za manje promjere vijaka čak mogao i u potpunosti izostaviti. Stoga je potrebno dodatno istražiti utjecaj promjera vijka na otkazivanje preko betona kada su rebra ploče postavljena poprečno na nosač.
- Dodatno, valjanost primjene faktora redukcije  $k_t$  mora se provjeriti kada se koriste čvrstoće čelika veće od  $450 \text{ N/mm}^2$  i moždanici promjera manjeg od 16 mm.
- Rezultati pokazuju da zbog malog razmaka posmičnih sredstava ne može doći do razvoja pune nosivosti betona u profiliranom rebu za svaki vijak posebno, jer vrlo brzo dolazi do preklapanja područja otkazivanja betona. Stoga je potrebno dodatno istražiti utjecaj razmaka vijaka unutar rebara betonske ploče na ponašanje modela s vijčanom posmičnom vezom.
- Gustoća betona, kada se koriste slične klase betona, ne utječe na ponašanje modela koji koriste posmičnu vezu s betonskim moždanicima.

## Financiranje

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

## Literatura

- [1] Wehbe N., Bahmani P., Wehbe A.: Behavior of Concrete/Cold Formed Steel Composite Beams: Experimental Development of a Novel Structural System, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* (2013), vol. 7, no. 1, pp. 51–59
- [2] Bamaga S. O. et al.: Feasibility of developing composite action between concrete and cold-formed steel beam, *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, no. 12, pp. 3689–3696, 2013.
- [3] M. Irwan J., Hanizah A. H., Azmi I.: Test of shear transfer enhancement in symmetric cold-formed steel–concrete composite beams, *J. Constr. Steel Res.* (2009), vol. 65, no. 12, pp. 2087–2098.
- [4] Hsu C-T., Punurai S., Punurai W., Majdi Y.: New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab, *Eng. Struct.* (2014), vol. 71, pp. 187–200.

- [5] Hanaor A.: Tests of composite beams with cold-formed sections, *J. Constr. Steel Res.* (2000), vol. 54, no. 2, pp. 245–264.
- [6] Dubina D., Ungureanu V., Gîlia L.: Experimental investigations of cold-formed steel beams of corrugated web and built-up section for flanges, *Thin-Walled Struct.* (2015), vol. 90, pp. 159–170.
- [7] Hamada M., Nakayama K., Kakihara M., Saloh K., Ohtake F.: Development of welded I-beam with corrugated web, *The Sumitomo Search* (1984), vol. 29, pp. 75–90.
- [8] Dubina D., Ungureanu V., and Gîlia L.: Cold-formed steel beams with corrugated web and discrete web-to-flange fasteners, *Steel Constr.* (2013), vol. 6, no. 2, pp. 74–81.
- [9] Ungureanu V. et al.: Welding technologies for built-up cold-formed steel beams: experimental investigations, in *Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018)*, 2018, p. e-Proceedings.
- [10] Bazar Ş., Ungureanu V., Dubină D., Burcă M.: Built-Up Cold-Formed Steel Beams with Corrugated Webs Connected with Spot Welding, *Adv. Mater. Res.* (2015), vol. 1111, pp. 157–162.
- [11] Briskham P., Blundell N., Han L., Hewitt R., Young K., Boomer D.: Comparison of Self-Pierce Riveting, Resistance Spot Welding and Spot Friction Joining for Aluminium Automotive Sheet, *SAE Technical Papers* (2006).
- [12] Ungureanu V., Lukačević I., Both I., Burca M., Dubina D.: Built-Up Cold-Formed Steel Beams with Corrugated Webs Connected by Spot Welding - Numerical Investigations, *International Colloquia on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2019)*, p. e-Proceedings.
- [13] Lukačević I., Čurković I., Rajić A., Čudina I.: Innovative Lightweight Cold-Formed Steel-Concrete Composite Floor System – LWT-FLOOR project, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* (2021), vol. 1203, no. 3, p. 032078.
- [14] European Committee for Standardization CEN, EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.
- [15] Jakovljević I., Spremić M., Marković Z.: Demountable composite steel-concrete floors: A state-of-the-art review, *Građevinar* (2021), vol. 73, no. 3. Union of Croatian Civil Engineers and Technicians, pp. 249–263.
- [16] Lakkavalli B. S., Liu Y.: Experimental study of composite cold-formed steel C-section floor joists, *J. Constr. Steel Res.* (2006), vol. 62, no. 10, pp. 995–1006.
- [17] Bamaga S. O., Tahir M. M., Tan C. S., Shek P. N., Aghlara R.: Push-out tests on three innovative shear connectors for composite cold-formed steel concrete beams, *Constr. Build. Mater.* (2019), vol. 223, pp. 288–298.

- [18] Majdi Y., Hsu C. T. T., Punurai S.: Local bond-slip behavior between cold-formed metal and concrete, *Engineering Structures* (2014), vol. 69. pp. 271–284.
- [19] User CAE. Abaqus 2016 (2016).
- [20] European Committee for Standardization CEN, EN ISO 898-1: 2013: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread, 2013.
- [21] European Committee for Standardization CEN, EN 1090-2: 2018: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures, 2018.
- [22] European Committee for Standardization CEN, EN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-5: Plated Structural Elements.,2005.
- [23] Lukačević I., Čurković I., Rajić A., Bartolac M.: Lightweight Composite Floor System—Cold-Formed Steel and Concrete—LWT-FLOOR Project, *Buildings* (2022), vol. 12, no. 2.
- [24] Arezoomand Langarudi P., Ebrahimnejad M.: Numerical study of the behavior of bolted shear connectors in composite slabs with steel deck, *Structures* (2020), vol. 26. pp. 501–515.
- [25] European Committee for Standardization CEN, EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.
- [26] Pavlović M., Marković Z., Veljković M., Buđevac D.: Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests, *J. Constr. Steel Res.* (2013), vol. 88, pp. 134–149.
- [27] European Committee for Standardization CEN, EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-8: Design of joints, 2005.

# Odabir optimalne mjere intenziteta tipične zidane zgrade u urbanom području grada Zagreba

Ante Pilipović<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Mario Uroš<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

U okviru analize ranjivosti ("fragility") i oštetljivosti ("vulnerability") tipičnih zgrada važan korak je odabir optimalne mjere intenziteta potresa (IM – eng. *intensity measure*) koja će dati najmanja rasipanja u odzivu konstrukcije na seizmičku pobudu. Odabrana je tipična zidana zgrada u centru Zagreba te je provedena inkrementalna dinamička analiza (IDA) i statistička obrada rezultata proračuna. Određen je odnos mjera intenziteta i srednjeg maksimalnog međukatnog pomaka ( $IDR_{avg}$ ) kao odabranog parametra seizmičkog odziva (EDP – eng. *engineering demand parameter*) metodom linearne regresije. Odabrane su optimalne mjere intenziteta između praktičnih kandidata po kriteriju najmanjeg rasipanja rezultata. Optimalne mjere intenziteta su vršna brzina tla PGV (eng. *peak ground velocity*) i srednja spektralna akceleracija  $S_{a,avg}$  (0,5s - 0,8s) te su vezane za brzine gibanja tla i odgovor konstrukcije u području vlastitih perioda.

*Ključne riječi: mjera intenziteta, parametar seizmičkog odziva, inkrementalna dinamička analiza, zidane zgrade, stanja oštećenja, odziv konstrukcije*

## Selection of optimal intensity measure for a typical masonry building in the urban area of Zagreb

### Abstract

In the scope of seismic fragility and vulnerability analysis of typical buildings an important step is the selection of optimal intensity measure (IM) for earthquakes that will give minimal dispersion in structural responses to seismic loading. A typical masonry building from Zagreb city centre is selected. Incremental dynamic analysis (IDA) is performed along with statistical processing of analysis results. Optimal intensity measures are selected among practical candidates by linear regression, observing the relationship between intensity measures and average maximum interstorey drift ( $IDR_{avg}$ ) as the selected engineering demand parameter (EDP). Optimal intensity measures are peak ground velocity PGV and average spectral acceleration  $S_{a,avg}$  (0,5s-0,8s) and are related to ground velocity and structural response in the period range of eigenvalues.

*Key words: intensity measure, engineering demand parameter, incremental dynamic analysis, masonry buildings, damage states, structural response*

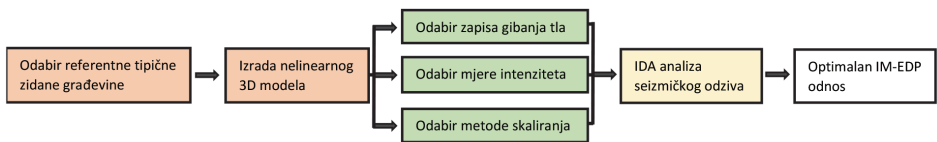
## 1 Uvod

Problem određivanja učinaka gibanja tla na ponašanje zgrada je ključna komponenta u procesu određivanja potresnog rizika nekog područja [1]. Do gibanja tla dolazi zbog pojave potresa, a njihove učinke na gibanje tla opisujemo preko determinističkih scenarija ili probabilističkom analizom seizmičkog hazarda (PSHA) nekog područja [2]. Potresi nastaju na rasjedima u zemljinoj kori, a skup svih seizmogenih rasjeda i njihove karakteristike određuje seizmotektonske značajke nekog područja. Gibanje tla uslijed potresa bilježi se akcelerografima i seizmografima iz kojih proizlaze kinematičke veličine akceleracije, brzine i pomaka tla ( $u(t)$ ), a koje su pogodne za primjenu pri proračunu građevinskih konstrukcija koje redovito numerički modeliramo i promatramo kao dinamičke sustave (oscilatore) [3]. Općenitije, možemo definirati mjeru intenziteta gibanja tla (IM) kao bilo koju veličinu koja će opisati gibanje tla, a koja će se moći dovesti u vezu s odzivom konstrukcije.

Krajnji učinci potresa redovito se izražavaju kroz stupnjeve oštećenja građevine određene graničnim vrijednostima nekog parametra seizmičkog odziva (EDP) pri kojem građevina prelazi iz jednog stanja oštećenja u drugo. Postoje razni EDP koji mogu opisivati stanje građevine nakon potresa, a obično su vezani za maksimalne pomake istaknutih točaka konstrukcije ili relativne pomake katova. Takvo određivanje oštećenja zahtijeva nelinearni model konstrukcije koji će moći opisati stvarno ponašanje građevina u području djelomičnog gubitka nosivosti te razlikovanje raznih stupnjeva oštećenja praćenjem samo jednog EDP. Jednako tako, i gibanje tla uslijed potresa se uzima kao jedinstvena vrijednost IM koja opisuje intenzitet konkretnog potresa.

Svaki zapis gibanja tla može se opisati različitim mjerama intenziteta. Neke od njih opisuju gibanje tla u vremenskom području (npr. PGA), dok druge opisuju učinke gibanja tla na linearne jednostupanjske (SDOF) oscilatore u frekventnom području (npr. spektralna akceleracija  $S_a$ ) te mogu biti vezane za dinamička svojstva konkretne građevine [4] ili ne moraju [5]. Za opis gibanja tla je prikladno uzeti onu mjeru koja će na optimalan način povezati učinke različitih potresa na gibanje tla na promatranoj lokaciji i odziv konstrukcije na toj lokaciji, izražen nekim EDP-om. Ove kriterije izražavamo pojmovima *efikasnosti* i *dostatnosti* mjere intenziteta [6-7]. *Efikasnost* mjeri rasipanje rezultata EDP za danu IM [8], a *dostatnost* promatra u kolikoj mjeri odabrana IM obuhvaća gibanje tla uslijed potresa raznih karakteristika koji su mogući na danom području. Nadalje, postoje vrlo efikasne i dostatne IM, ali ih se ne može lako izračunati iz zapisa gibanja tla, stoga je i *praktičnost* IM važan kriterij jer je u suprotnom bitno sužen prostor njezine šire upotrebe. Postoje i drugi kriteriji važni pri nalaženju krivulja ranjivosti koje ovdje nećemo razmatrati [9]. Odabir optimalne mjere intenziteta stoga se svodi na odabir one mjere koja ima najveću *efikasnost*, *dostatnost* i *praktičnost* za promatrano seizmički aktivno područje i za promatrane tipove građevina izložene potresu na tom području [10].

U sklopu 2BESAFE projekta koji se bavi izradom novih modela oštetljivosti tipičnih zgrada u urbanim područjima bitan korak je odrediti optimalnu mjeru intenziteta za odabrane građevine koje će se razmatrati [11]. Ovo su glavni doprinosi sadašnjeg istraživanja: (1) odabrana je referentna tipična zidana zgrada u gradu Zagrebu, (2) uspostavljen je 3D model konstrukcije koji uključuje materijalnu i geometrijsku nelinearnost te je odabran prikladan EDP parametar koji opisuje odziv konstrukcije, (3) odabrani su zapisi gibanja tla uslijed potresa reprezentativni za grad Zagreb te način njihovog skaliranja, (4) odabrane su IM po kriteriju praktičnosti, između kojih će se birati optimalna IM temeljem efikasnosti kao najboljeg pokazatelja te je (5) provedena inkrementalna nelinearna “time-history” analiza konstrukcije (IDA) pri djelovanju odabranih zapisa gibanja tla pri raznim intenzitetima. Kao rezultat dobiven je oblak parova točaka IM-EDP za sve IM te je provedena statistička analiza kojom je utvrđena optimalna mjera intenziteta (slika 1).



Slika 1. Shematski prikaz procesa odabira optimalnog odnosa IM-EDP

## 2 Opis odabrane referentne tipične zgrade

U centru Zagreba uobičajena je zidana tipska zgrada unutar bloka, građena u prvoj polovici 20.st. Nosivi sustav je nearmirano žiđe s usvojenim karakteristikama materijala danima u tablici 1. Zgrada je tlocrtnih dimenzija 1170 x 910 mm visine kata 3,8 m. Za ovaj tip zgrade radi jednostavnosti usvojena je katnost P+3K iako većina realnih građevina ovoga tipa ima i poluukopani podrum. Zgrada je postavljena na krute ležajeve, a utjecaj tla uzet je kroz izbor potresnih zapisa, no radi se o tlu C kategorije. Zgrada ima nosive zidove u oba smjera i to 17 % u X te 10,13 % u Y smjeru u prizemlju. Nosivi zidovi su debljine 60 cm, 45 cm (stubište) i 30 cm (dilatacija sa susjednim zgradama), a pregradni zidovi su debljine 15 cm. Stubište se proteže u Y smjeru sa suprotne strane od pročelja. Kao stropna konstrukcija pretpostavljeni su drveni grednici sa više slojeva dasaka koji imaju funkciju relativno krute dijafragme te su time izbjegnuti lokalni mehanizmi otkazivanja i osigurano je globalno ponašanje konstrukcije. Ukupna masa zgrade (bez temelja) je 929 t i raspodijeljena je u čvorovima konačnih elemenata. Dinamička svojstva zgrade za prva tri oblika titranja prikazana su u tablici 2, a sami oblici na slici 2. Odabran je koeficijent kritičnog vi-skognog prigušenja.

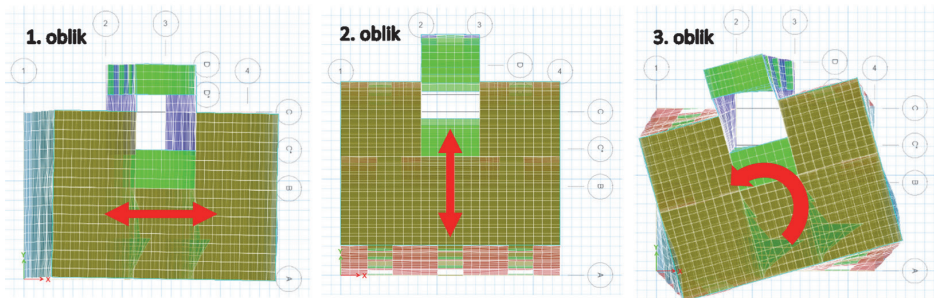


Tablica 1. Mehaničke karakteristike ziđa

Zapreminska težina	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	18
Modul elastičnosti	$E_M$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1500
Modul posmika	$G_M$ [N/mm <sup>2</sup> ]	500
Tlačna čvrstoća ziđa	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,400
Početna posmična čvrstoća ziđa	$f_{v0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,160
Dijagonalna vlačna čvrstoća ziđa	$f_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,114
Koeficijent trenja	$\mu$	0,400
Tlačna čvrstoća opeke	$f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10,00

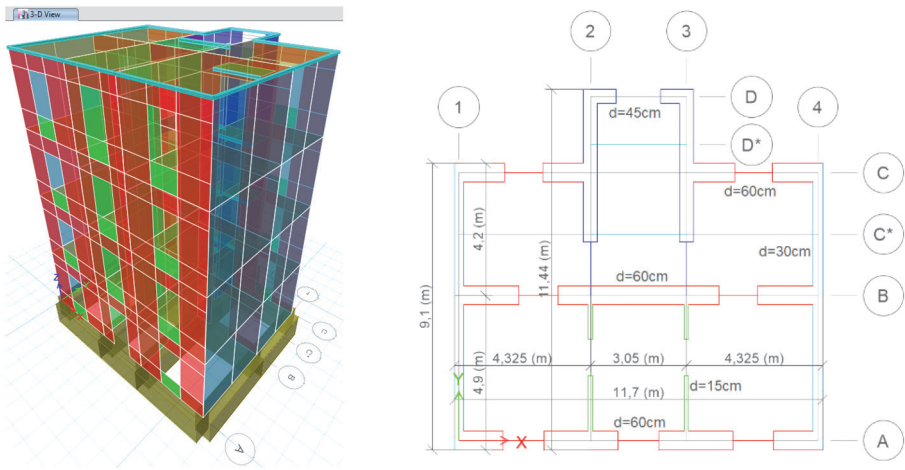
Tablica 2. Frekvencije i periodi titranja za prva tri oblika titranja zgrade

Oblik titranja	Period T [s]	Frekvencija f [Hz]
1	0,428	2,339
2	0,422	2,368
3	0,288	3,469



Slika 2. Prva tri oblika titranja

Izrađen je 3D model u računalnom programu ETABS (slika 3) [12] te je najprije proveden linearni proračun prema EC6 i EC8 uzimajući u obzir smanjenje krutosti uslijed raspucavanja poprečnih presjeka. Prema dobivenim rezultatima proveden je proračun posmične nosivosti ziđa za svaki od mehanizama sloma kao podloga za definiranje nelinearnih posmičnih plastičnih zglobova na sredini svakog ziđa koji opisuju dominantni nelinearni doprinos pri odzivu konstrukcije. Krivulje kapaciteta nosivosti plastičnih zglobova definirane su kao trilinearni dijagrami poprečna sila-pomak s padajućom zadnjom granom. Sami nelinearni dinamički proračuni izvršeni su direktnom integracijom Hilber-Hughes-Taylor metodom.



Slika 3. Prikaz 3D modela i karakterističnog tlocrta referentne građevine iz računalnog programa ETABS

### 3 Ulazni podaci

#### 3.1 Izbor zapisa gibanja tla i način skaliranja

S obzirom da se Zagreb nalazi na području s kompresijskom tektonikom gdje prevladavaju reversni rasjedi, izabrani su uglavnom akcelerogrami nastali od potresa na takvim rasjedima [13]. Ukupno je odabrano 13 parova zapisa gibanja tla (X i Y smjer). Od njih je 11 iz američke baze potresnih zapisa Peer NGA-West 2 [14], te 2 domaća od posljednjih potresa u Zagrebu (ožujak 2020.) i Petrinji (prosinac 2020.). Potres u Petrinji nastao je na "strike-slip" rasjedu i odabran je kako bi se uzela u obzir prisutnost i takvih tipova rasjeda koji se ne mogu zanemariti.

U tablici 3 prikazani su svi odabrani potresni zapisi s pripadajućim izvornim seizmotektonskim parametrima i mjerama intenziteta PGA, PGV i  $S_{a,avg}$  (0,5s - 0,8s) u Y smjeru bez faktora skaliranja. Ovih 13 zapisa nije dovoljno da opišu odziv konstrukcije podjednako na svim razinama seizmičkog opterećenja. Umjesto odabira dodatnih zapisa koji bi pokrili mnogo različitih intenziteta potresa (opisanih preko IM) odabran je IDA pristup uniformnog skaliranja svih zapisa po intenzitetima unaprijed određenima fiksnim nizom vrijednosti PGA (0,1g – 0,25g u inkrementima od 0,025g). Koristeći program SeismoSignal svaki pojedini par zapisa najprije je skaliran (faktorom skaliranja istim za oba smjera) na vrijednost PGA od 0,1g, a zatim i na ostale veće vrijednosti [15]. Zapisi su skalirani s obzirom na PGA vrijednost u X smjeru. Zagrebački i petrinjski potres skalirani su u istim inkrementima sve do 0,3g jer se pokazalo da uzrokuju manja oštećenja.

Budući da se ovdje ne radi o proračunu konstrukcije za određenu razinu seizmičkog hazarda, a korištenjem IDA metode nije niti moguće odabrati zapise konzistentne s hazardom dane lokacije, zapisi nisu skalirani s obzirom na odabrani ciljani spektar, već je mjera skaliranja upravo inkrement u intenzitetu PGA od 0,025g. Na taj način dolazimo do 96 parova akcelerograma koji su korišteni kao ulazno opterećenje za proračun konstrukcije.

**Tablica 3. Seizmotektonski parametri odabranih potresnih zapisa**

ID	Mjerna postaja	Magnituda $M_w$	Udaljenost od rasjeda $R_{rup}$ [km]	Mehanizam rasjeda	Brzina posmičnih valova $V_{s,30}$ [m/s]	Izvorni PGA [g]	Izvorni PGV [m/s]	Izvorni $S_{a,avg}$ [g]
RSN70_SFE	San Fernando	6,61	27,4	Reversni	425,34	0,114	0,148	0,266
RSN130_F	Friuli 02 – Buia	5,91	11,03	Reversni	310,68	0,094	0,121	0,192
RSN359_C	Coalinga – 01	6,36	26,38	Reversni	381,27	0,232	0,275	0,288
RSN949_N	Northridge – 01 – Arleta	6,69	8,66	Reversni	297,71	0,308	0,23	0,568
RSN953_N	Northridge – 01 – Beverly Hills	6,69	17,15	Reversni	355,81	0,488	0,667	1,27
RSN957_N	Northridge – 01 – Burbank	6,69	16,88	Reversni	581,93	0,159	0,095	0,161
RSN4276_F	Friuli Aftershock – Buia	5,5	12,39	Reversni	310,68	0,106	0,09	0,218
RSN4277_F	Friuli Aftershock – Forgaria Cornino	5,5	16,52	Reversni	412,37	0,234	0,115	0,168
RSN4455_M	Montenegro – Herceg Novi	7,1	25,55	Reversni	585,04	0,255	0,134	0,313
RSN4456_M	Montenegro – Petrovac	7,1	8,01	Reversni	543,26	0,301	0,253	0,778
RSN4457_M	Montenegro – Ulcinj	7,1	4,35	Reversni	410,35	0,228	0,282	0,494
UHS_ZG_22_03	Zagreb 22.3.2020.	5,3	8	Reversni	<380,00	0,222	0,204	0,395
UHS_Petrinja	Petrinja, prosinac 2020.	6,4	47	“Strike – slip“	<380,00	0,126	0,059	0,117

### 3.2 Izbor mjera intenziteta gibanja tla (IM) i parametra seizmičkog odziva (EDP)

Razmotrene su samo praktične mjere intenziteta za koje nije potrebno mnogo dodatnog računa kako bi se odredile njihove vrijednosti. Prikazane su u tablici 4, a izračunate su pomoću programa SeismoSpect [15] za zadani skup potresnih zapisa. Ove mjere se najčešće i koriste u literaturi.

U odabranom skupu IM imamo predstavnike mjera u vremenskom i frekventnom području odziva, kao i mjere bazirane na akceleraciji, brzini i pomaku. Mjere temeljene na akceleraciji dobro opisuju odziv mase zgrade u smislu inercijalnih sila, a one bazirane na brzini više obuhvaćaju energetski odziv i disipaciju energije konstrukcije, dok mjere temeljene na pomacima dobro obuhvaćaju osjetljivost krutosti konstrukcije na potresnu pobudu. Optimalna mjera intenziteta stoga daje uvid i u način ponašanja konstrukcije.

Postoje i druge, preciznije mjere intenziteta, poput srednje spektralne akceleracije po periodima konstrukcije s težinskim faktorima jednakima faktorima modalne participacije [16, 17], no zbog manje praktičnosti se neće ovdje razmatrati.

Kao parametar seizmičkog odziva (EDP) odabran je srednji maksimalni međukatni pomak svih katova  $IDR_{avg}$  kao parametar temeljen na relativnim pomacima. Često se koristi jer se pokazalo da dobro razgraničuje stanja oštećenja konstrukcije, osobito stanje značajnog oštećenja [18].

## 4 Rezultati analize

Provedena je inkrementalna dinamička analiza (IDA) na 3D modelu temeljem 96 proračuna proizašlih iz 13 različitih parova zapisa horizontalnog ubrzanja tla (istovremeno u X i Y smjeru) skaliranih na 7-9 vrijednosti PGA raspodijeljenih po jednakim razmacima. Analiza je provedena koristeći računalo s procesorom 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9-11900K @ 3.50GHz i 64GB RAM memorije, za što je trebalo u prosjeku 36 sati po proračunu. Na taj način dobiveno je 96 parova točaka (IM, EDP) koji su statistički obrađeni kako bi se odredila optimalna mjera intenziteta. Na mjesto IM stavili smo svaku od 13 odabranih mjera intenziteta, a na mjesto EDP srednji maksimalni međukatni pomak  $IDR_{avg}$ .

### 4.1 Efikasnost

Statistička obrada provedena je postupkom linearne regresije [18, 19]. Ako logaritmujemo IM i EDP parove vrijednosti, uočavamo da su linearno povezani, te se takav postupak standardno primjenjuje pri određivanju efikasnosti mjere intenziteta. Tako algebarski izraz kojim opisujemo vezu IM-EDP možemo zapisati:

$$EPD = a \cdot IM^b \quad (1)$$

pri čemu su  $a$  i  $b$  regresijski koeficijenti koji se određuju metodom najmanjih kvadrata.

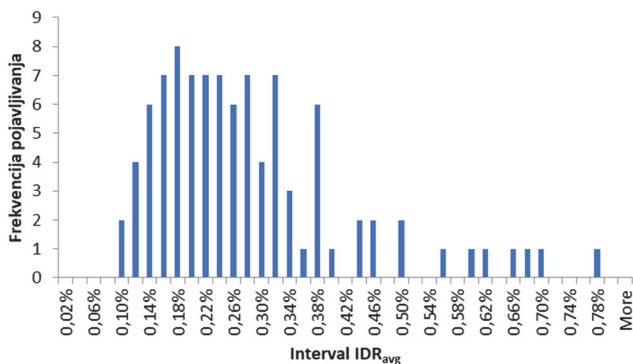
Na slici 4 je prikazana distribucija dobivenog EDP parametra od svih proračuna. Anderson-Darlingovim testom ustanovljeno je da se ne može odbaciti da dobivena distribucija pripada lognormalnoj raspodjeli, te je ona usvojena kao raspodjela za EDP. Stoga raspodjela slučajne veličine EDP/IM slijedi lognormalnu raspodjelu sa srednjom vrijednošću

$$\mu_{\ln EDP/IM} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln \widehat{EDP}_i}{N} \quad (2)$$

i standardnom devijacijom

$$\sigma_{\ln EDP/IM}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [\ln \widehat{EDP}_i - \mu_{\ln EDP/IM}]^2}{N-2} \quad (3)$$

gdje je vrijednost dobivena uvrštavanjem svakog pojedinog intenziteta u nizu od 96 proračuna u algebarski izraz s pripadajućim regresijskim koeficijentima. U tablici 4 dan je popis svih ispitanih mjera intenziteta s pripadajućim izračunatim statističkim parametrima.



Slika 4. Distribucija EDP parametra  $IDR_{avg}$  za sve proračune

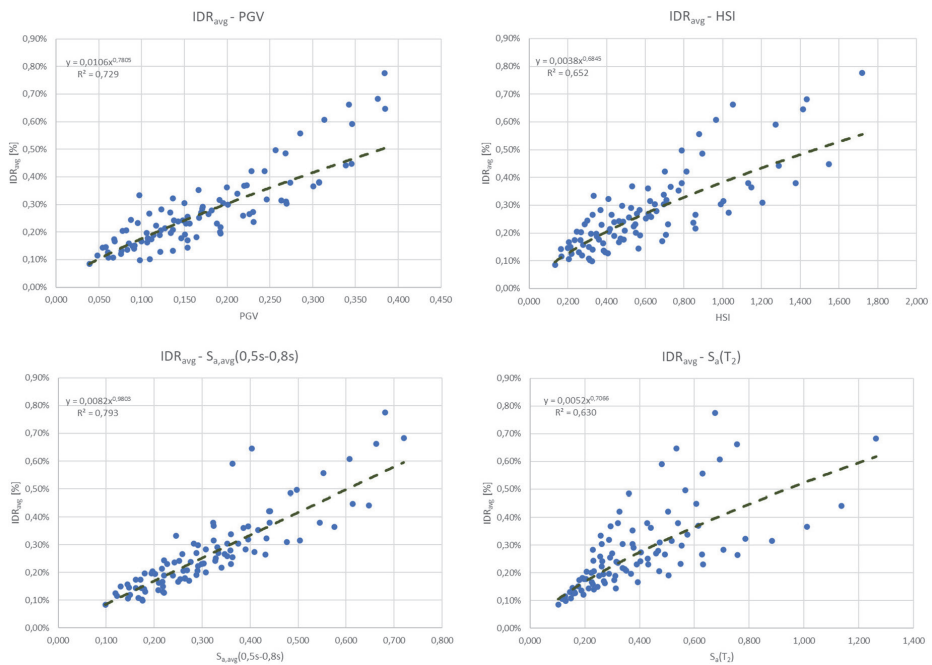
**Tablica 4. Parametri regresijskog modela, standardna devijacija  $\sigma$ , koeficijenti korelacije R i varijacije C.O.V.**

IM	Opis	Izraz	a	b	R <sup>2</sup>	$\sigma$	C.O.V.
PGA [g]	Vršno ubrzanje tla	$\max( \ddot{u}(t) )$	0,0078	0,6792	0,4668	0,3511	0,0583
PGV [m/s]	Vršna brzina tla	$\max( \dot{u}(t) )$	0,0106	0,7805	0,7293	0,2502	0,0415
PGD [m]	Vršni pomak tla	$\max( u(t) )$	0,0098	0,3929	0,3574	0,3854	0,0640
$A_{rms}$ [g]	Srednja kvadratna akceleracija	$\left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} (\ddot{u}(t))^2 dt\right)^{\frac{1}{2}}$	0,0182	0,5423	0,3176	0,3972	0,0659
$V_{rms}$ [m/s]	Srednja kvadratna brzina	$\left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} (\dot{u}(t))^2 dt\right)^{\frac{1}{2}}$	0,0271	0,6496	0,4690	0,3504	0,0582
$D_{rms}$ [m]	Srednji kvadratni pomak	$\left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} (u(t))^2 dt\right)^{\frac{1}{2}}$	0,0074	0,2192	0,1501	0,4433	0,0736
$I_A$ [m/s]	Ariasov intenzitet [20]	$\frac{\cos^{-1}\xi}{g\sqrt{1-\xi^2}} \int_0^{t_0} (\ddot{u}(t))^2 dt$	0,0036	0,3631	0,5020	0,3393	0,0563
$I_c$	Karakteristični intenzitet [21]	$A_{rms}^{1,5} \cdot t_d^{0,5}$	0,0136	0,4567	0,4494	0,3568	0,0592
CAV [m/s]	Kumulativna apsolutna brzina [22]	$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0}  \dot{u}(t)  dt$	0,0010	0,6116	0,4068	0,3703	0,0615
HSI [m]	Housnerov spektralni intenzitet [23]	$\int_{0,1}^{2,5} PSV(T, \xi) dT$	0,0038	0,6845	0,6524	0,2835	0,0471
$S_{a,avg}(0,5-0,8s)$ [g]	Srednja spektralna akceleracija [24]	$\frac{1}{0,3} \int_{0,5}^{0,8} S_a(T, \xi) dT$	0,0082	0,9803	0,7930	0,2188	0,0363
$S_a(T_1)$ [g]	Spektralna akceleracija pri $T_1$	$S_a(T_1, \xi)$	0,0066	0,7888	0,5858	0,3094	0,0514
$S_a(T_2)$ [g]	Spektralna akceleracija pri $T_2$	$S_a(T_2, \xi)$	0,0052	0,7066	0,6298	0,2926	0,0486

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da su vršna brzina tla PGV i srednja spektralna akceleracija u fiksnom rasponu perioda  $S_{a,avg}(0,5s-0,8s)$  najefikasnije mjere intenziteta. Imaju najmanji koeficijent varijacije, odnosno daju najmanje rasipanje rezultata. Vrijedno je pogledati i koeficijente korelacije, koji su za ove dvije mjere intenziteta najveći. Koeficijent korelacije R opisuje u kolikoj mjeri IM i EDP statistički ovise jedan o drugome te stoga predstavlja bolji prediktivni faktor za neke druge potrese koji

moгу djelovati na odabranu zgradu [19]. Spektralna akceleracija pri periodu drugog oblika  $S_a(T_2)$  (Y smjer) te Housnerova mjera intenziteta HSI sljedeće su najefikasnije mjere.

Na slici 5 prikazane su ovisnosti IM-EDP u obliku oblaka točaka za četiri najpovoljnije mjere intenziteta. Prikazane su i regresijske krivulje koje na linearnoj skali poprimaju oblik potencije.  $S_{a,avg}$  (0,5s-0,8s) i PGV su zaista najefikasnije mjere intenziteta sa najmanjim rasipanjem rezultata. Već je sada vidljivo koliko varijabilnosti postoji u određivanju povezanosti IM-EDP. Stoga je odabir optimalne mjere intenziteta važan doprinos smanjivanju brojnih neodređenosti i nesigurnosti u proračunu. Dobar odabir mjere intenziteta također donekle nadomješta manjkavosti u izboru potresnih zapisa.



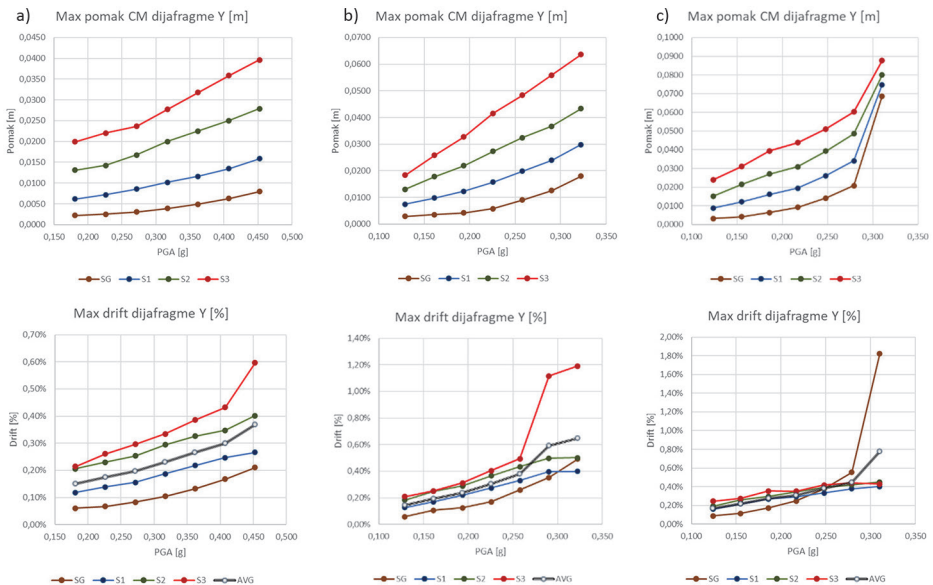
Slika 5. Izvedene ovisnosti IM-EDP za sljedeće IM: PGV, HSI,  $S_{a,avg}$  (0,5s-0,8s),  $S_a(T_2)$

S obzirom na IM koje se odnose na parametre amplitude gibanja tla, PGV je dao najbolje rezultate. HSI je mjera u području pseudobrzine, ali vezana za frekvencijski sadržaj odgovora konstrukcije. Odgovor odabrane tipske zidane zgrade najviše se događa kroz energiju gibanja zgrade. S druge strane,  $S_{a,avg}$  (0,5s-0,8s) kao mjera vezana za akceleraciju najbolje opisuje povezanost odziva konstrukcije i potresne pobude, i to u području perioda referentne zgrade koji se povećava sa smanjenjem krutosti kao posljedica oštećenja pojedinih elemenata.

## 4.2 Ponašanje konstrukcije

Podrobnijom analizom IDA krivulja razdijeljenih po katovima za pojedine zapise možemo doći do daljnjih uvida o načinu odziva konstrukcije. Na slici 6 su prikazani odnosi  $IDR_{max,kata}$  i  $D_{CM,max,kata}$  (maksimalni pomak centra mase kata) prema PGA za sve razine intenziteta te za nekoliko potresnih zapisa.

Uočavamo najprije različite načine odziva konstrukcije po visini. Zapis RSN4277\_F uzrokovao je progresivno sve veće pomake prema gornjim katovima, dok su ostali zapisi uzrokovali podjednake pomake svih katova za sve razine intenziteta potresa, osim pri najvećim razinama. Progibna linija konstrukcije različita je i ovisi o potresnoj pobudi. Konstrukcija ima kapacitet za odgovor na oba načina. Nadalje, vidimo da su potresi RSN4277\_F i RSN359\_C uzrokovali slom najvišeg kata jer on u zadnjem inkrementu ima naglo povećanje pomaka, dok ostali katovi i dalje prate svoj trend postupnog povećanja pomaka. Nosivost se iscrpila na najvišem katu. S druge strane, potres RSN4457\_M uzrokovao je slom u prizemlju pri najvećoj razini intenziteta, a iz prikaza maksimalnih pomaka vidimo da istovremeno svi katovi prate nagli skok u pomaku. Dogodio se posmični slom prizemlja te se cijela zgrada translatala u smjeru djelovanja potresa.



Slika 6. Ovisnost EDP-PGA po katovima za zapise: a) RSN4277\_F; b) RSN359\_C i c) RSN4457\_M

Rezultati u X smjeru dali su sličan poredak efikasnosti IM, uz nešto slabiju korelaciju za većinu IM, uključujući PGV i HSI koje su vezane za brzine. Međutim,  $S_{a,avg}$  (0,5s-0,8s) za oba smjera ostaje jednako efikasna, no  $S_a(T_1)$  u X smjeru postiže



$R^2=0,865$  što je čini optimalnom za X smjer. Gibanje u X smjeru je dominantno te je  $R^2$  relativno visok za  $S_a(T_1)$  i u Y smjeru. Ipak,  $S_{a,avg}$  (0,5s-0,8s) ostaje bolji izbor zbog konzistentne efikasnosti u oba smjera.

## 5 Zaključak

Provedena je analiza ovisnosti između mjera intenziteta gibanja tla (IM) i odabranog parametra seizmičkog odziva (EDP) s ciljem određivanja optimalne mjere intenziteta za odabranu referentnu tipičnu zidanu zgradu. Kao rezultat statističke obrade podataka izvedene su odgovarajuće ovisnosti između 13 različitih mjera intenziteta i srednjeg maksimalnog međukatnog pomaka  $IDR_{avg}$  koje se mogu primijeniti pri određivanju maksimalnog odziva referentne zidane zgrade unutar bloka u centru Zagreba.

Pronađene su dvije optimalne i praktične mjere intenziteta:  $S_{a,avg}$  (0,5s - 0,8s) i PGV, koje su pokazale najveći stupanj korelacije s  $IDR_{avg}$ . Slijede ih HSI i  $S_a(T_2)$ . Referentna zgrada osjetljiva je na brzinu tla i na akceleraciju u frekventnom području svojih prvih oblika titranja. Odziv zgrade na potres događa se primarno kroz disipaciju energije tijekom gibanja zgrade.

Različiti zapisi uzrokuju raznovrsne mehanizme i lokacije otkazivanja. To ukazuje na različitost potresnih pobuda koje mogu djelovati na konstrukciju, ali i na širinu mogućnosti konstrukcije da se na pobudu odazove na različite načine, bilo otkazivanjem prizemlja ili najgornjeg kata. Optimalna mjera intenziteta obuhvaća sve ove načine odziva konstrukcije te dobro opisuje odziv pri istoj razini intenziteta ma kakav bio njezin način otkazivanja u mehaničkom smislu.

Dobiveni rezultati služe kao podloga za daljnje istraživanje koje obuhvaća analizu stanja oštećenja konstrukcije s obzirom na IM kako bi se vidjelo koja mjera intenziteta bolje razgraničuje stanja oštećenja i pri kojim EDP vrijednostima se ona ostvaruju, te temeljem toga izradu krivulja ranjivosti i oštetljivosti za referentnu građevinu.

## Zahvala

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP – 2020-02-1128.

## Literatura

- [1] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Rizik od potresa: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjericama za budućnost, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 10, pp.923-947
- [2] Dasović, I., Herak, M., Prevolnik, S.: Uvodno o potresu i njegovim učincima (poglavlje), Potresno inženjerstvo: Obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp.13-36, 2021
- [3] Chopra, A.K.: Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, First Edition, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1995
- [4] Kostinakis, K., Fontara, I.K., Athanatopoulou, A.M.: Scalar structure-specific ground motion intensity measures for assessing the seismic performance of structures: a review, Journal of Earthquake Engineering, 22, pp.630-665, 2018
- [5] Yang, D., Pan, J., Li, G.: Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 38, pp.1257–1280, 2009
- [6] Giovenale, P., Cornell, C.A., Esteva, L.: Comparing the adequacy of alternative ground motion intensity measures for the estimation of structural responses, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 33, pp.951-979, 2004
- [7] Luco, N., Cornell, C.A.: Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions, Earthquake Spectra, 23, pp.357-392, 2007
- [8] Kazantzi, A.K., Vamvatsikos, D.: Intensity measure selection for vulnerability studies of building classes, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 44, pp. 2677–2694, 2015
- [9] Padgett, J.E., Nielson, B.G., Desroches, R.: Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37, pp.711-725, 2008
- [10] Pitilakis, K., Crowley, H., Kaynia, A.M.: Fragility functions of masonry buildings (Chapter), SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk, Springer, Dordrecht, pp.111-156, 2014
- [11] Žagar, T., Uroš, M., Atalić, J.: Izloženost tipskih zgrada u Zagrebu izgrađenih u drugoj polovini 20. stoljeća, 7. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Zagreb, pp. 135-150, 2021
- [12] Computers & Structures, Inc., ETABS: Integrated Building Design Software, version 17, CSI, Berkeley, 2018
- [13] Herak, D., Herak, M., Tomljenović, B.: Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia, Tectonophysics, 465, pp.212–220, 2009

- [14] Ancheta, T.D., Bozorgnia, Y., Darragh, R.: PEER NGA-West2 Database: A Database of Ground Motions Recorded in Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 37, Lisbon, pp.30013-30019, 2012
- [15] Seismosoft Ltd., Seismoapps, Technical Information Sheet, Seismosoft's Suite of Earthquake Tools, Pavia, 2018
- [16] Vamvatsikos, D., Cornell, C.A.: Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 34, pp.1573–1600, 2005
- [17] Zhou, Y., Su, N., Lu, X.: An elastic spectral value-based intensity measure for the incremental dynamic analysis of tall buildings, Proceedings of the 5th Kwang-Hua Forum on innovations and implementations in earthquake engineering research, Shanghai, China, 2012
- [18] Pejović, J., Janković, S.: Ovisnost odziva armiranobetonskih visokih zgrada o mjeri intenziteta potresa, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 8, pp.749-759
- [19] Yan, Y., Xia, Y., Yang, J., Sun, L.: Optimal selection of scalar and vector-valued seismic intensity measures based on Gaussian Process Regression, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 152, 2022
- [20] Arias, A.: A measure of earthquake intensity, In: Hansen RJ (ed) Seismic design for nuclear power plants, MIT Press, Cambridge MA, pp. 438–483, 1970
- [22] Park, Y.J., Ang, A.H.S., Wen, Y.K.: Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings, Journal of Structural Engineering, 111, pp.740–57, 1985
- [23] Electrical Power Research Institute (EPRI): Criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake, Rapport np-5930 2848-16, USA: Electric Power Research Institute, 1988
- [24] Housner, G.: Measures of severity of earthquake ground shaking, In: Proceedings of US national conference on earthquake engineering, Ann Arbor, MI: EERI, pp.25–33, 1975
- [25] Eads, L., Miranda, E., Lignos, D.G.: Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 44, pp. 2057–2073, 2015

# Analiza utjecaja primjene geomreža na mehanizam loma u tlu kod plitkog temeljenja

mr. sc. **Anesa Merdan**<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. **Mario Bačić**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sarajevo, BiH, [amerdan@student.grad.hr](mailto:amerdan@student.grad.hr)

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, [mario.bacic@grad.unizg.hr](mailto:mario.bacic@grad.unizg.hr)

## Sažetak

Uporaba geosintetičkih materijala za poboljšanje nosivosti tla kod plitkog temeljenja spada u novija područja proučavanja geotehničkog inženjerstva. O utjecaju ugradnje geosintetičkih materijala na nosivosti tla proveden je veliki broj studija temeljenih na eksperimentalnim i numeričkim analizama. U radu je napravljen pregled niza radova koji obrađuju temu primjene armiranja tla geomrežama i utjecaj armiranja na mehanizme sloma tla kod plitkoga temeljenja. Rad služi kao podloga za nastavak istraživanja koji će obuhvatiti analize osjetljivosti utjecaja relevantnih parametara geosintetika na mehanizme sloma.

*Ključne riječi: plitko temeljenje, slom temeljnog tla, armiranje tla, geomreže*

## Analysis of the influence of geogrids on the failure mechanisms of the shallow foundations

### Abstract

The use of geosynthetic materials to improve soil bearing capacity below shallow foundation is relatively novel area of study of geotechnical engineering. A large number of studies have been carried out analysing impact of geosynthetic materials on the bearing capacity of the soil, and these are based mostly on experimental analysis and numerical simulations. This work gives an overview of studies about the application of reinforcement of soil with geogrids and their influences on the soil failure mechanisms. The work represents a basis for future investigations analysing the sensitivity of influence of the relevant parameters of geosynthetics on failure mechanisms.

*Key words: shallow foundation, soil failure, soil reinforcement, geogrids*

## 1 Uvod

### 1.1. Plitko temeljenje

Temelji su prijelazni dijelovi konstrukcije u kojima se preraspodjeljuju unutarnje sile iz vitkih i tankih elemenata konstrukcije u masivne i široke zone tla, kojima se ona veže za tlo. Neposredni prijenos opterećenja od građevine na temeljno tlo zahtijeva ispunjenje određenih pretpostavki o karakteristikama temeljnoga tla. Tlo mora zadovoljiti zahtijevanu sigurnost od sloma, a slijeganja građevine moraju biti u dopuštenim granicama za nesmetano funkcioniranje objekta. Razlikuju se tri načina temeljenja: plitko temeljenje, plitko temeljenje na poboljšanom tlu i duboko temeljenje [1]. U radu Szavits-Nossan, A., Ivšić, T. [2], prema Eurokodu plitkim temeljima smatraju se temelji čija je širina veća od dubine temeljenja ( $D < B$ ). Ovisno o kvaliteti temeljnog tla, plitko temeljenje se može dijeliti:

- a) kod slabo stišljivog tla i malih deformacija - temelji samci, temeljne trake;
- b) kod jače stišljivih, nehomogenih tala uz pojavu veće deformacije - temeljni nosači, roštilji i ploče;
- c) sve vrste građevina i nasipa - temeljenje na poboljšanom tlu [2].

### 1.2. Mehanizmi sloma u tlu

Za analizu nosivosti tla potrebna je interpretacija uvjeta u tlu, koja se zasniva na podacima iz istražnih radova. Ako tlo nema potrebnu nosivost doći će do sloma, koji se može definirati na osnovi sljedećih kriterija:

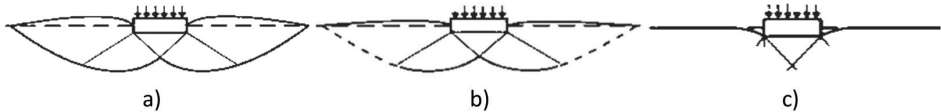
- a) Nagli porast deformacija, praćeno slomom tla ispod konstrukcije. Ovaj kriterij se odnosi na sposobnost temeljnog tla da na siguran način prihvati primijenjeno opterećenje;
- b) Prevelike deformacije, koje konstrukcija ne može podnijeti bez posljedica. Ovaj kriterij se odnosi na potencijal temeljnog tla u pogledu slijeganja pod primijenjenim opterećenjem.

Slom u temeljnom tlu može se pojaviti, u ovisnosti o zbijenosti ili stanja konzistencije tla, u tri osnovna oblika:

1. Opći smičući slom, koji je karakterističan za dobro zbijeno krupnozrno tlo i prekonsolidiranu glinu. Događa se relativno naglo, uz formiranje kontinualnih kliznih ploha koje polaze od ruba temelja i prostiru se do površine terena. Tlo ispod stope temelja tone, a u okolici se izdiže. Slijeganje se povećava skoro linearno do relativno velikog opterećenja (slika 1a);
2. Lokalni smičući slom, karakterističan za slabije zbijeno krupnozrno tlo i glinu meke konzistencije. Na krivulji "Opterećenje - Slijeganje" uočava se prijelomna točka kojoj odgovara formiranje ograničene klizne plohe. Deformacije prije slo-

ma su relativno velike, klizne plohe se formiraju samo neposredno ispod temelja i ne dopiru do površine terena, a izdizanje tla uz temelj je malo (slika 1b);

3. **Probojni smičući slom**, karakterističan za rastresiti pijesak i nekonsolidiranu meku glinu. Pri porastu opterećenja temelj kontinualno tone, uz vertikalno smicanje po rubu temelja. Tlo izvan opterećene površine ostaje relativno neporemećeno, osim utiskivanja uz rubove temelja. Do sloma dolazi bez pojave vidljivih kliznih ploha, sa izuzetkom formiranja trokutaste prizme ispod temelja (slika 1c).



Slika 1. Tri načina sloma tla kod plitkog temelja [3]

Slom tla ispod plitkih temelja jasno je definiran samo u slučaju općeg sloma tla, pa su i računska rješenja izvedena uz pretpostavku općeg sloma kruto-plastičnog materijala (tla), čija je čvrstoća definirana Mohr-Coulomb-ovim uvjetom sloma:

$$\text{za koherentna tla: } \tau_f = c + \sigma'_n \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

$$\text{za nekoherentna tla: } \tau_f = \sigma'_n \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

gdje je:  $c$  - kohezija,  $\varphi$  - kut unutarnjeg trenja,  $\sigma'_n$  - normalno efektivno naprezanje koje djeluje na istoj ravnini kao i posmično naprezanje  $\tau_f$ . Ova ravnina se naziva ravninom sloma. Parametri tla  $c$  i  $\varphi$  su parametri posmične čvrstoće tla [3, 4].

## 2 Primjena geosintetika

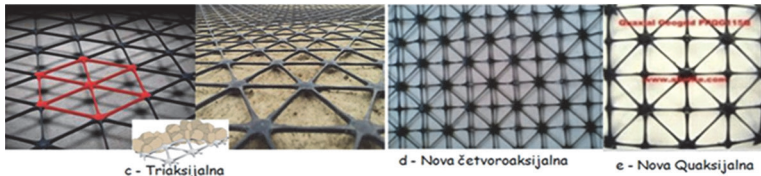
### 2.1. Općenito o geosinteticima

Geosintetici su materijali napravljeni od polimera, a dijele se prema načinu i vrsti proizvodnje na geotekstile, geomembrane, geomreže, geoćelije, geokompozite, geotepihe i geopjene.

**Geotekstil** je propusni, polimerni sintetički materijal a koristi se u funkcijama razdvajanja, armiranja tla, kao filter ili zaštitni sloj u dodiru s tlom i drugim građevinskim materijalima. Prema načinu izrade dijeli se na tkani, i lijepljeni i pleteni geotekstil.

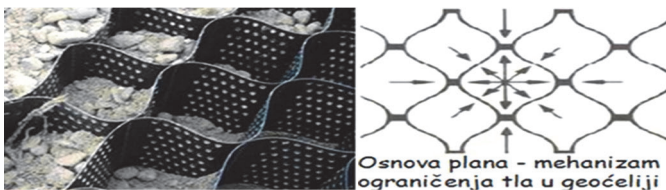
**Geomreža** je plošna, polimerna struktura, koja se sastoji od pravilne otvorene mreže integralno povezanih elastičnih elemenata, koji se mogu povezati ekstruzijom, lijepljenjem ili preplitanjem, čiji su otvori veći od čestica tla, a koriste se u građevinarstvu prvenstveno za armiranje tla. Karakterizira ih velika vlačna čvrstoća i velika krutost, pa se zbog toga najčešće koriste za armiranje tla jer mu povećavaju krutost,

ojačavaju ga i umanjuju deformacije u tlu. Za armiranje i stabilizaciju slabo nosivog tla materijal čija je veličina frakcije veća od otvora mreže, nasipa se na geomrežu i time dolazi do uklještenja materijala u otvorima geomreže čime nastaje sustav otporan na vanjske sile. Vlačna čvrstoća geomreže u interakciji s tlom djeluje na uvećanje čvrstoće i umanjene deformacija u tlu (slika 2a).



Slika 2a. Triax geomreža katalog, <http://www.tensar.com.hr> [3]

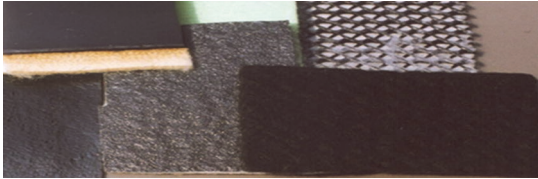
**Geočelije (geosaće)** sastoje se od povezanih polimernih traka sačastih oblika otvora u mreži, a postavljenih jedna do druge spojene trakama od ekstrudiranih sintetičkih materijala. Osnovna funkcija geosaća je da zadržava zemlju ili drugi rastresiti materijal, a koristi se za stabilizaciju površinskog tla na strmim padinama ili kao ojačanje temeljnog slabo nosivog tla. Trake su spojene u formu međusobno povezanih ćelija koje su ispunjene zemljom i ponekad betonom. Za razliku od geomreža, geočelije mogu koristiti široki raspon materijala ispune i nisu ograničene na visoko kvalitetni agregat potreban kod geomreža. U posebnim slučajevima, trake geomreža širine od 0,5 m do 1 m su povezane zajedno sa vertikalnim polimernim štapovima koji se koriste za formiranje debljih slojeva geočelija, koji se nazivaju **geotepisi** (madraci). Geočelije su 3D strukture koje koriste čvrstoću zida ćelije, pasivne tlakove u tlu i zaptivanje čestica tla kako bi stvorili čvrst sloj u vidu geotepiha (madraca). Naponi izazvani opterećenjem prenose se iz čestica ispune na ćelijski zid i suzbijaju otpore zida obruča i pasivni otpor susjednih ćelija (slika 2b).



Slika 2b. Geočelije koje se koriste za zadržavanje i stabilizaciju tla [3]

**Geopjena** - stiropor je blok čvrstog pjenastog polimernog materijala (polistirena) koji se obično koristi kao lagano punjenje u funkciji toplinske izolacije u smrznutom tlu ili za smanjenje napona kod mekih stišljivih tala zbog težine materijala ispune.

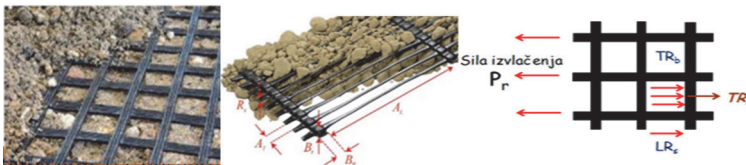
**Geokompoziti od geomreže i geotekstila** se sastoje od spoja geosintetika određениh svojstava, tako da dobivamo optimalna svojstva potrebna za rješenje višestrukih problema. Geokompoziti se mogu sastojati od jedne geomreže i jednog ili dva sloja geotekstila. Takav kompozit ima drenažna i filtracijska svojstva, a može obavljati i funkciju armiranja. Spajanje geomreža i geotekstila obavlja se tvornički termičkim ili kemijskim načinom (slika 2c) [3, 5, 8].



Slika 2c. Geokompoziti [3]

## 2.2 Funkcija armiranja tla - poboljšanje otpornosti na smicanje u tlu

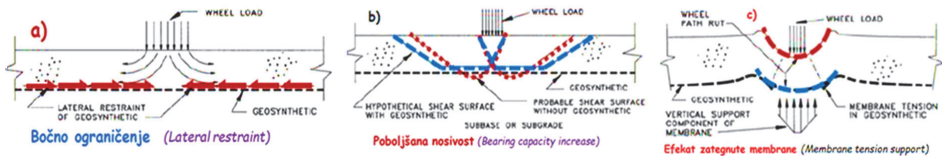
Problemi gradnje na uslojenim i slabo nosivim tlima mogli bi se rješavati uporabom geosintetika koji imaju funkciju armiranja tla. Armiranje tla koristi svojstva dva potpuno različita materijala, tla i armature, koji objedinjuju sposobnosti za preuzimanje tlačnih (tlo) i vlačnih (armatura) naprezanja. Kod konstrukcija od armiranog tla, tlo predstavlja dio nosivog sustava a ne dio opterećenja. Geosintetici koji se upotrebljavaju u funkciji armiranja tla su geomreže, geočelije, geotekstili i geokompoziti. U hidrotehnici, geomreže većih otvora koriste se za izradu gabiona i temeljnih madraca, a manjih otvora za stabilizaciju slabo nosivog temeljnog tla, nasutih objekata (brane, pregrada i nasipa) te za pridržavanje humusa u izvedbi travnate zaštite pokosa. Pri uređenju slabo nosivog temeljnog tla primjenjuju se geomreže koje preuzimaju vlačne sile u dva okomita pravca. Geomreže imaju primarnu funkciju armiranja i sporednu funkciju mehaničkog odvajanja materijala. Kod funkcije armiranja, geomreže preuzimaju vlačne sile i trenjem ih prenose u tlo uz ograničenu deformaciju. Osim vlačne čvrstoće važna je i krutost geomreža (slika 3).



Slika 3. Primjer ugrađivanja geomreža - interakcija s tlom (uklještenje zrna) [3]

Ovisno o načinu opterećenja i položaju geosintetika, moguća su dva osnovna tipa armiranja, membranski tip i posmični tip (sidreni tip) (slika 4) [3].





Slika 4. Mehanizmi ojačanja geomreže bočnog ograničenja (a), poboljšana nosivost (b) i učinak zategnute membrane (c) [3]

Membransko armiranje nastaje kada se vertikalno opterećenje primijeni na geosintetiku na deformabilnom tlu. U geosintetiku imamo vlačno naprezanje što rasterećuje tlo koje ga samo ne bi moglo preuzeti. Kod izraženijih deformacija geomreža i zrnatog sloja tla dolazi do pojave zvane “učinak napete membrane”, tada geosintetik preuzima opterećenja i dolazi do pojave rasterećenja tla. Učinak napete membrane izazvan je vertikalnim deformacijama, što dovodi do konkavnog oblika geosintetika [3].

Posmično armiranje se javlja zbog učinka posmika na plohamu geosintetika i tla. Kod armiranja geomrežama, dolazi do uklještenja kamenih zrna u njenim otvorima, time se sprječavaju horizontalna pomjeranja tla. Na taj se način dobiva površina s vrlo jakim trenjem što doprinosi učinkovitosti armiranja (posmično armiranje). Interakcija između zrnatih čestica tla i geosintetika omogućava prijenos opterećenja na smicanje od sloja podloge na vlačno opterećenje u geosintetici. Kod posmično sidrenog armiranja, trenje postoji s obje strane elemenata koji služe za sidrenje. Vlačna čvrstoća geosintetika ograničava bočne deformacije tla što dovodi do povećanja čvrstoće na smicanje. I trenje i međusobno povezivanje na kontaktu između tla i geosintetika doprinose ovom mehanizmu. Za geomrežu, to znači da otvori kod geomreže moraju biti pravilno dimenzionirani prema veličini čestica tla. Takav sustav može ispuniti konstruktivne zahtjeve kao što su sprječavanje bočnog rasprostiranja sloja tla, krutosti sloja tla, poboljšanje raspodjele vertikalnih napona i smanjenje napona smicanja u tlu [3].

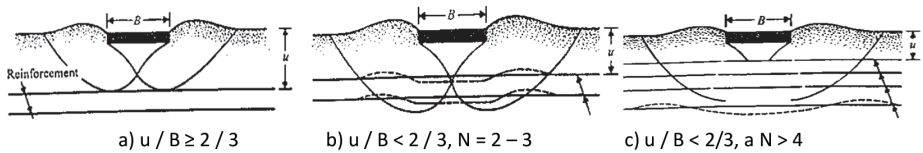
Vlačna čvrstoća spada u skupinu mehaničkih svojstava geosintetika. Parametri koji utječu na ponašanje materijala geosintetika su vrsta, temperatura, brzina istezanja i građa geosintetika. Trenje ovisi o više pojedinačnih parametara, kao što su hrapavost površine polimera, veličina i oblik zrna tla, prisutnost vode (porni tlak). Kod geomreža, na trenje najviše utječe tlo koje ulazi u otvore mreža, što posebno dolazi do izražaja kod nekoherentnog tla [3, 8].

### 3 Utjecaj geomreža na mehanizme sloma kod plitkog temeljenja

Brojna istraživanja analizirala su utjecaje armiranja tla geomrežama na mehanizme sloma kod plitkog temeljenja. U nastavku je napravljen pregled nekih od njih.

Binquet i Lee [6] su proučavali nosivost plitkih temelja na armiranom tlu. U radu su

autori definirali mehanizme sloma tla armiranog geomrežama kod plitkog temeljenja u ovisnosti o dubini armature i broja slojeva armiranja (slika 5a, b i c). Ovisnost dubine polaganja gornjeg sloja armature  $u$  i  $B$  širine temelja, izražen je kao bezdimenzionalni omjer  $u/B$ . Priroda sloma u masi tla slika 5a javlja se kada je prvi sloj armature položen na dubinu  $u > 0,67 B$ . Armatura djeluje kao kruta podloga i nalazi se na definiranoj dubini. Tip sloma sa slike 5b javlja se kada je omjer  $u/B < 0,67$ , a broj slojeva armature  $N < 2$  ili 3. Kod ove vrste sloma dolazi do izvlačenja armature. Najveći učinak kod armiranja tla se dobiva kada je omjer  $u/B < 0,67$ , a broj slojeva armature  $N > 4$ , ali ne veći 6 ili 7 (slika 5c) [6, 7].



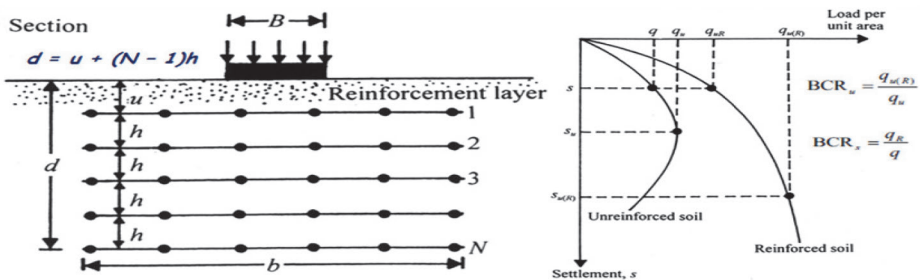
Slika 5. Tri načina loma tla ispod trakastih temelja na armiranom tlu [6]

Stanković [3] je u svom radu naveo pojašnjenje za povećanje nosivosti uslijed armiranja tla koja se izražava preko bezdimenzionalnog parametra koji se naziva faktor nosivosti, BCR. Faktor nosivosti može se izraziti ili u obliku granične nosivosti ili dozvoljene nosivosti od opterećenja temelja (slika 6). Na osnovi ovog koncepta, omjer nosivosti može se definirati kao:

$$BCR_u = q_{u(R)} / q_u \quad (3)$$

$$BCR_s = q_R / q \quad (4)$$

Potrebne vrijednosti granične i dozvoljene nosivosti za izračun faktora nosivosti (BCR) su  $q_{u(R)}$  granična nosivost temelja u armiranom tlu i  $q_u$  granična nosivost temelja u nearmiranom tlu, a  $q_R$  dozvoljena nosivost temelja u armiranom tlu i  $q$  dozvoljena nosivost temelja u nearmiranom tlu.



Slika 6. Geometrijski parametri za armirano tlo i tipične krivulje opterećenja za nearmirano i armirano tlo [3]

BCRu i BCRs bit će uvjetovani stupnjem zbijenosti tla, relativnom krutosti geomreže i geometrijskim omjerima dimenzija parametara kod armiranog tla, kao što su položaj gornjeg sloja armature **u**, ukupna dubina polaganja armature **d**, broj slojeva armature **N**, vertikalni razmak između dva sloja armature **h**, širina položenog sloja armature **b**, duljina položenog sloja armature **l**, kao i bezdimenzionalni omjeri  $u/B$ ,  $b/B$ ,  $l/B$ ,  $h/B$  i  $d/B$  (slika 6) [3].

Guido i dr. [9] su u radu pokusima dokazali koji parametri utječe na nosivost tla armiranog geomrežama, kod pravokutne stope temelja na pjeskovitom tlu. To su dubina polaganja prvog sloja armature, vertikalni razmak između slojeva armature, broj slojeva armature, veličina otvora geomreža, širina zone armiranja, položaj geomreže u odnosu na položaj temelja i vlačna čvrstoća geomreža.

Malpani, S. i Patil, G. K. [10] su u radu tabelarno prikazali rezultate niza istraživanja vezanih za uporabu geosintetika i njihov utjecaj na nosivost temeljnog tla.

**Tablica 1. Prikaz značajnijih istraživanja nosivosti tla armiranog geosinteticima [10]**

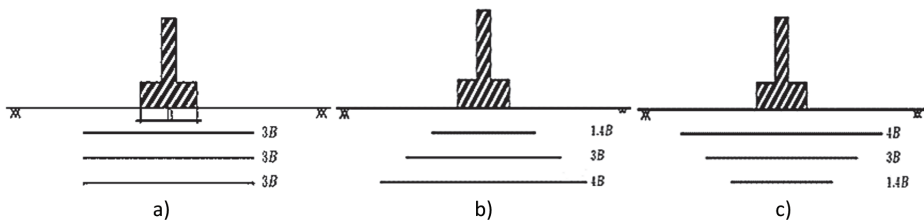
No.	Autori	Vrsta geosintetika	Zaključak
1.	S. K. Dash i dr (2001) i (2004)	armiranje geocelijama	Povećava nosivost i stabilnost u odnosu na rotaciju, slom nije uočen pri slijeganju = 45 % širine temelja i opterećenjem 8 x većem od krajnje nosivosti nearmiranog tla
2.	Guido i dr (1980)	armiranje geomrežama	Uvećanje BCR (engl. bearing capacity ratio)odnos nosivosti
3.	Zhao i dr (1997)	više slojeva geomreža	Stabilizira slabo nosivo tlo i donosi značajne uštede u materijalu i troškovima iskopavanja
4.	A. Marto i dr. (2017)	armiranje geomrežom,	Dopuštena nosivost povećava se s povećanim brojem slojeva armature i smanjuje se slijeganje kod plitkog temeljenja
5.	M. Latha, A. Somawanshi (2009)	mreže nosive u dva i jednom pravcu	Optimalna širina područja armiranja je 4 x širina temelja
6.	P. K. Kolay i dr. (2013)	armiranje geomrežama	Nosivost tla povećava se od 16,67 % kod uporabe jednog sloja geomreža na spoju slojeva različitog materijala tla, a nosivost se povećava na 33,33 % se armiranjem gornjeg sloja tla. Geomreže su postavljene na različitim dubinama kod dvoslojnoga tla (pjeskovito-glinovita tla i sloj pijeska)

U radu autori zaključuju da su odabir vrste geosintetika, širina i dubina armiranja, kao i raspored slojeva armature uvjetovani i svojstvima tla koje se armira. Autori također zaključuju da je faktor nosivosti BCR omjer granične nosivosti armiranog tla i granične nosivosti nearmiranog tla. Granična nosivost se povećava uporabom

geosintetičkog armaturnog sloja. U svim studijama se faktor nosivosti BCR mijenja u odnosu na položaj armaturnih slojeva ispod temelja [10].

Kolay i dr. [17] su u svom radu istražili učinak broja slojeva i dubine postavljanja geomreža na poboljšanje nosivosti na dvoslojnom tlu od pjeskovitih glina sa površinskim slojem pijeska. Provedena su ispitivanja modela za pravokutnu temeljnu stopu. Rezultati su pokazali da se nosivost tla povećala s povećanjem broja slojeva armature. Nosivost tla se povećala i kod uporabe jednog sloja geomreža na spoju slojeva različitog tla uz armiranje i gornjega površinskog pjeskovitog sloja [17].

Rowshanzamir i Karimian [18] su u radu istraživali učinke geometrije polaganja slojeva geomreža kod armiranja tla. Proveli su pokuse s postavljanjem armaturnih slojeva geomreže u različitim formama kod armiranja pjeskovitog tla. Ispitivan je i učinak gustoće tla na nosivost armiranog sloja tla (slika 7a, b i c).

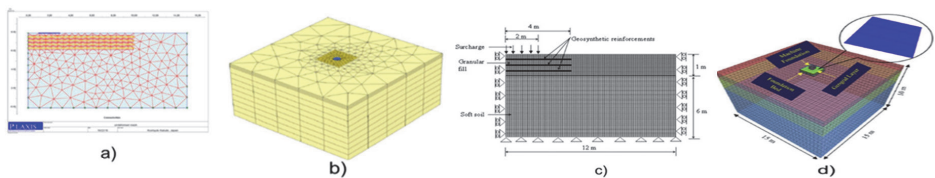


Slika 7. Jednolika forma armiranja, trapezoidni i inverzni trapezoidni raspored armature u 3 sloja [18]

Prva skupina pokusa provedena je u formi jednolikog rasporeda slojeva armature s tri geomrežna sloja istih dimenzija. U drugoj pokusnoj skupini je ista količina geomreža postavljena u trapezoidnoj formi geometrijskog rasporeda tako da su gornji slojevi postavljene geomreže najmanje površine, a dimenzije ostalih slojeva geomreža se povećavaju s povećanjem dubine ugradnje. Treća pokusna skupina je napravljena s istom količinom geomreža postavljenih u geometrijsku formu inverznog trapezoidnog rasporeda pa su površine slojeva smanjivane s povećanjem dubine ugradnje. Rezultati pokusa su pokazali da je kod različitih gustoća tla najveća nosivost armiranoga tla dobivena u formi inverznog trapezoidnog rasporeda armature, a najmanja nosivost tla kod trapezoidne forme armiranja [18].

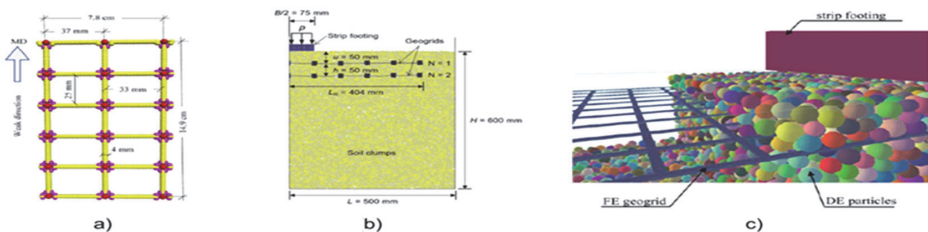
Gou i dr. [19] su u radu iznijeli zaključke iz pokusnih istraživanja, kao i zaključke numeričkog i analitičkog modeliranja za mehanizme kod ravninskog armiranja tla za plitko temeljenje. Dobiveni rezultati daju podatke o tomu da se potrebna dubina ugradnje ( $u$ ) gornjeg sloja armature kreće od  $0,3B$  do  $0,4B$ , gdje je  $B$  širina ili promjer temelja. Razmak između slojeva armature ( $h$ ) se kreće od  $0,2B$  do  $0,4B$ . Duljina sloja armature ( $L$ ) varira od  $4B$  do  $5B$ . Numeričkim simulacijama kombiniraju se rezultati dobiveni iz ispitivanja na laboratorijskim modelima s onim dobivenim simulacijama računalnim programima kao što su omjeri opterećenja - slijeganja, porast i raspodjela naprezanja i utjecaj parametara armature, kao što su raspodjela polja pomaka tla, deformacije i raspodjela naprezanja u armaturi te interakcija tla i armature [19].

Numeričke metode modeliranja obuhvaćaju metodu konačnih elemenata i metodu diskretnih elemenata. U jednom od načina izračuna, armirana zona se (uključujući i tlo i armaturu) smatra homogenim tлом i pri proračunima se uzimaju u obzir parametri homogenog tla kod Gou i dr. [19]. Drugi način je promatranje armiranog tla kao nehomogeno, pa se parametri tla, armature i njihove interakcije uzimaju zasebno u proračunu u numeričkim modelima. U ovim numeričkim modelima armatura se smatra kontinuiranim linearno-elastičnim ili elastično-plastičnim materijalom, te je teško simulirati stvarnu geometriju geomreže u praksi, kao što su otvor rešetke geomreže, interakcija između rebra rešetke geomreže i okolnih čestica tla. U literaturi su navedeni neki od softvera za izračun metodom konačnih elemenata PLAXIS 2D i 3D i FLAC 2D i 3D (slika 8a, b, c i d) [19].



Slika 8. Numerički model pomoću različitih softvera: a) PLAXIS 2D; b) PLAXIS 3D; c) FLAC 2D; d) FLAC 3D[19]

Metoda diskretnih elemenata numeričke simulacije prikazuje interakciju između zrnatih tala i armature, analizirajući mikromehaničke karakteristike čestica tla (slika 9) [19].



Slika 9. Numerički modeli: a) geomreža koja koristi PFC ; b) armatura i temelj primjenom PFC-a; c) armiranje na temelju metode konačnih diskretnih elemenata [19]

U dvodimenzionalnom numeričkom modelu sferne čestice su povezane kako bi simulirale horizontalno postavljene slojeve armature, dok se u trodimenzionalnom numeričkom modelu veliki broj sfernih čestica koristi za modeliranje geometrije geomreže, kao i za simulaciju različitih vrsta tla. U ovom modelu se konačni elementi koriste za simulaciju materijala armature, a čestice diskretnih elemenata se koriste za modeliranje čestica tla. Fizikalna i mehanička svojstva tla simuliraju se definira-

njem mikroparametara čestica, koeficijenta trenja i koeficijenta krutosti (slika 9) [19].

#### 4 Zaključak i preporuke za daljnja istraživanja

Prema podacima objavljenim u pregledanoj literaturi, može se zaključiti da broj i način izračuna parametara koji utječu na učinak armiranja tla kod plitkog temeljenja ovisi o vrsti armature i njenim parametrima, pa će buduća ispitivanja analizirati primjenu kombinacija geosintetika (geomreže, geoćelije, geotepisi, geopjene). Kod kombinacija različite vrste geosintetika pažnju treba posvetiti i geometrijskim pravcima postavljanja geosintetika. Posebice treba proučiti i različita djelovanja koja su povezana s pozicioniranjem armature ispod temelja, a prema veličini površine ravnine koja se armira polaganjem armaturnih slojeva, kao i postavke položaja prvog i zadnjeg sloja armature. U nastavku istraživanja vezanih za izradu doktorskoga rada korisno bi bilo ispitati djelovanja armiranja kod više uslojenih tala, kao i interakciju geomreža u kombinacijama slojeva različitog tla, kao što su lomljeni kamen, šljunak različitih granulacija, rahlo tlo, proslojene gline i slično, te utjecaje takvih kombinacija armiranog tla na mehanizam sloma tla kod plitkog temeljenja.

#### Literatura

- [1] Ivšić, T.: Plitki temelji, Diplomski sveučilišni studij, Geotehnika, Geotehničko inženjerstvo, Plitki temelji - Građevinski fakultet, <https://www.grad.unizg.hr> › Predavanja\_2 › Ivsic, 2012.
- [2] Szavits-Nossan, A., Ivšić, T.: Novi Eurokod 7: geotehničko projektiranje, 4. Savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva (4th Conf. of Croatian Geotechnical Society), Ojačanje tla i stijena, Opatija, R Hrvatska (Croatia), 5.-7. listopada, Volume: pp. 455-470, 2006.
- [3] Stanković, M.: Geosintetici u infrastrukturnim projektima - Treća revolucija u građevinarstvu, Primena plastičnih materijala (geosintetika u izgradnji i održavanju saobraćajnica i dr. objekata, Beograd, 2019.
- [4] Trbljanić, M.: Dokazi graničnog stanja nosivosti plitkih temelja prema Eurokodu 7, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Repozitorij Geotehničkog fakulteta Varaždin, urn:nbn:hr:130:042333, 2016.
- [5] Merdan, A.: The use of geosynthetics for stabilization of slope in the area of Canton Sarajevo, Thesis, MSc in Geotechnical Engineering Design and Management, The Nottingham Trent University, UK, 2004.
- [6] Binquet, J., Lee, K.L.: Bearing capacity tests on reinforced earth mass; Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1241-55, [Google Scholar] 1975.

- [7] Mohanty, M., Behavior of strip footing on multilayered geogrid reinforced sand bed, report submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Technology in Civil Engineering Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkela, <https://core.ac.uk> brought to you by CORE provided by <https://ethesis@nitr>, 2007.
- [8] Babić, Geosintetici 07 - Geosintetici u geotehnici, Post on 23-Feb-2018, <https://www.worlddocuments.com>
- [9] Guido, V. A., Biesiadecki, G. L., Sullivan, M. J.: Bearing capacity of a geotextile-reinforced foundation, International Society For Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, <https://www.issmge.org/publications/online-library>, 1985.
- [10] Malpani, S., Patil, G. K.: A Review on Parametric Study of Geosynthetic Material below Strip Footing, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Journal Vol. 7, Issue 6, [www.ijirset.com](http://www.ijirset.com), 2018.
- [11] Dash, S. K., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R.: Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations, Geosynthetics International, <https://www.researchgate.net> , 2004.
- [12] Dash, S.K., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R.: Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement, Geotextiles and Geomembranes 19 529–538, <https://www.researchgate.net> 2001.
- [13] Guido, V.A. Knueppel, J.K., Sweeny, M. A.: Plate load tests on geogrid reinforced earth, Bureau of Indian Standards, New Delhi IS: 2720-Part, 1980
- [14] Zhao, A., Williams, G.S., Waxse, J.A.: Field performance of weak subgrade stabilization with multilayer geogrids, Geotextiles and Geomembranes Volume 15, Issues 4–6, Pages 183-195, 1997.
- [15] A. Marto, M. O. Mohsen, N. Z. M. Yunus: Effect of placement depth of geocell reinforcement in sand deposit, Malaysian Journal of Civil Engineering 27 Special Issue (1):224-234, 2015.
- [16] Latha, G. M., Somawanshi, A.: Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand, Geotext. Geomembr. 27, 281–294, 2009.
- [17] Kolay, P. K., Kumar, S., Tiwari D. : Improvement of Bearing Capacity of Shallow Foundation on Geogrid Reinforced Silty Clay and Sand, Research, Volume <https://www.researchgate.net/publication/258391862>, Article ID 293809, 10 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/293809>, 2013.
- [18] Rowshanzamir, M.A., Karimian, M.: Bearing capacity of square footings on sand reinforced with dissimilar geogrid layers, Scientia Iranica (2016),
- [19] Guo, X., Zhang, H., Liu L.: Planar geosynthetic-reinforced soil foundations: a review, SN Applied Sciences <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03930-5>, 2020.

# On the relation of microstructure development and time- zero as the beginning of autogenous shrinkage

Katarina Didulica<sup>1</sup>, Asst. Prof. Ana Baričević<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, katarina.didulica@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, ana.baricevic@grad.unizg.hr

## Abstract

In cementitious composites, the hydration process is the most important feature. The conditions, rate, and general manner of this process affect the properties of composites both at early and later ages. The development and prediction of future properties can be studied using both destructive and non-destructive methods to predict the potential and behaviour at later ages. Due to the early occurrence of autogenous shrinkage and the large influence of chemical shrinkage, the hydration process and the formation of the microstructure play an important role in determining the time zero point for autogenous shrinkage and the overall determination of the shrinkage value.

*Key words: hydration process, microstructure, properties development, autogenous shrinkage, time- zero*

## Odnos razvoja mikrostrukture i početka mjerenja autogenog skupljanja

### Sažetak

U cementnim kompozitima, proces hidratacije je najvažnija značajka. Uvjeti, brzina i opći način odvijanja procesa utječu na svojstva kompozita u ranoj i kasnijoj starosti. Razvoj i predviđanje budućih svojstava mogu se proučavati razornim i nerazornim metodama za predviđanje potencijala i ponašanja u kasnijoj dobi. Zbog rane pojave autogenog skupljanja i velikog utjecaja kemijskog skupljanja, proces hidratacije i formiranje mikrostrukture igraju važnu ulogu u određivanju nulte točke mjerenja autogenog skupljanja i ukupnom određivanju vrijednosti skupljanja.

*Gljučne riječi: proces hidratacije, mikrostruktura, razvoj svojstava, autogeno skupljanje, time- zero*



## 1 Introduction

The development of concrete theory and technology has led to the development of cementitious materials with (ultra) high strength - (U)HS and (ultra) high performance - (U)HP [1, 2]. The novel materials have overcome the shortcomings of ordinary cementitious material but amplified certain negative aspects, such as shrinkage and resulting cracks [3 – 5]. (U)HSC and (U)HPC materials differ from OPC in having a lower water content, i.e., a lower w/c ratio, and a higher content of mineral and chemical additives as well as other inclusions. Therefore, this composition leads to differences in the hydration process that strongly affect the volume changes at early ages [6–8]. Shrinkage is visible as either a reduction in length or volume caused by moisture loss, temperature changes, or chemical reactions. The types of early- age shrinkage of cementitious materials are chemical, autogenous, drying, and thermal shrinkage. Chemical shrinkage can be quantitatively significant but occurs in the early stages of the hydration process when the microstructure is still fluid, while other types of shrinkage result in the formation of cracks.

The hydration process begins with the contact of the cement or binder with water, which leads to the dissolution of ions in the water and continues in the formation of hydrates [9–11]. These chemical reactions lead to the formation of a solid matrix and consequently to the release of heat [11, 12]. The formation of the structure is accompanied by the development of measurable mechanical properties such as strength and modulus of elasticity. Since mechanical properties develop over time and at a high rate at an early age, their measurement by destructive methods is difficult and is subject to long-term measurement by non-destructive methods.

In addition to mechanical properties, volume deformation must also be monitored over time. The measurement of autogenous shrinkage after demoulding proved to be too late, while the measurement after mixing contains parts of chemical shrinkage. Although there is general agreement on the theory of chemical and autogenous shrinkage and some test methods are standardized, to obtain realistic values of autogenous shrinkage, it is necessary to determine a time-zero to make the measurement reliable, i.e., to avoid over- or underestimation. Time- zero refers to the point in time when cementitious materials begin to behave like a solid, which can be referred to as the time of divergence between chemical shrinkage and autogenous shrinkage [13]. Although in standardized methods the time zero is determined by the setting time, which is determined by the penetration of a Vicat needle, several publications [14–19] have pointed out possible discrepancies related to the onset of the measurement and the uncertainty and unreliability of the proposed method, indicating that further studies on the microstructure development and on the internal relative humidity and temperature change are needed [20, 21].

In this work, a systematic literature review of test methods for monitoring microstructure development from the onset of hydration was conducted to compile existing test methods and evaluate their impact on the determination of time- zero and overall autogenous shrinkage.

## 2 Methods to test autogenous shrinkage

Autogenous deformation is the total deformation of a closed, isothermal system of cementitious material that is not exposed to external influences [13, 22, 23]. In this way, drying shrinkage and temperature-induced shrinkage are eliminated. Autogenous deformation is further divided into shrinkage and swelling. Autogenous swelling is a short-term phenomenon due to the formation of crystals from hydration products in the initial phase; it occurs when bleed water is reabsorbed [23]. The more water present, the greater the swelling and the longer it lasts [8]. Autogenous shrinkage occurs in all cement mixtures; in ordinary concrete it is of low value and without much effect, but in mixtures with (ultra) high strength and/or performance it has a greater effect. A reduced amount of water and an increased proportion of binder ( $w/b < 0.4$ ) or the proportion of cement replacement by mineral admixtures lead to faster water consumption and a greater occurrence of self-drying [4, 16]. The mechanisms of autogenous shrinkage can be reduced to three basic mechanisms: chemical shrinkage, hardened cement paste, microstructure development and self-desiccation or change of relative humidity in the pores [13, 22, 23].

Chemical shrinkage occurs in parallel with the hydration process because the initial volume of the material has a higher value than that of the hydration products. It is due to the difference in density between free and chemically bound water and non-hydrated cement and hydrates [13, 23]. The chemical shrinkage depends on the amount of basic constituents and their composition [5, 24].

The development of hydration leads to the binding of hydration products and the formation of a microstructure that develops mechanical properties that can resist volume reduction, resulting in the formation of pores. Due to the still high water content, the pores formed are filled with water. The space of free water is filled by hydration products and the volume difference leads to pore formation. The decrease in the degree of saturation and the resulting pressure in the pores cause the matrix to shrink. When the sample is isolated, there is no mass transfer with the environment. The process of decreasing the degree of saturation in the pores is called self-desiccation, and the resulting stresses and shrinkage are called autogenous shrinkage. Larger pores empty first, but the rate of water consumption in the pores during the hydration process also depends on the base constituents [5, 20]. Measurement of autogenous shrinkage can be performed on prismatic specimens according to the Tazawa guidelines [25] or on corrugated tube specimens according

to the ASTM standard [26]. Although the specimens are shaped differently, the test settings are made to reduce the frictional effect as much as possible and simulate the volume change by a linear change. For both methods, the start of the measurement is indicated by the setting time, Figure 1. According to standards, the setting time is determined by observing the penetration of a needle into the cement paste. Regardless of whether the test is manual or automatic, the time that elapses from the time of mixing until the needle reaches a certain value is given after three measurements for the initial and final setting time. The setting time is the time required for the hydration products to bind together and form a structure that resists penetration by the needle [11]. It is defined with initial and final time and can be measured on paste and mortar, while changes in aggregates are required at the concrete level. The negative aspects of testing the setting time with this method are the differences between the values in standards, the limited number of tests due to the size of the specimen, the disturbance of the specimen at each penetration, and, for measurements on concrete, the measurement on a sieved concrete mix due the limitations of using coarse aggregates.

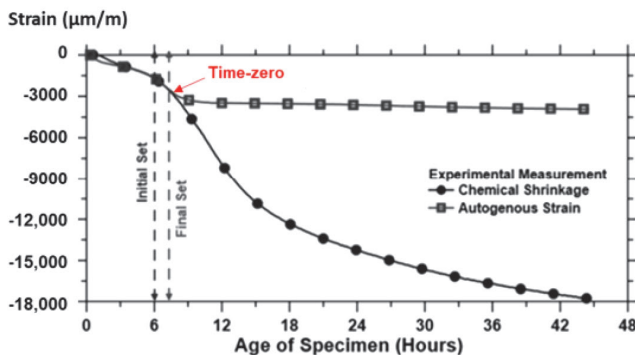


Figure 1. Time of divergence between chemical and autogenous shrinkage as shown in [19]

As the field developed, various authors noted discrepancies in the measurement of setting and autogenous shrinkage and therefore proposed other methods, such as the measurement of the change in internal relative humidity, temperature, time of maximum expansion and rate of change of shrinkage [14–20]. Each of these methods derives from the definition of autogenous shrinkage, but individually leads to different shrinkage values.

### 3 Monitoring the development of the microstructure

The term hydration, in the context of cement compositions, refers to the reaction of cement particles or one of their constituents with water, resulting in chemical and physical-mechanical changes in the system with respect to setting and hardening [10]. The water-cement or water-binder ratio has a significant influence, as these ratios control the microstructure of the hardened cement paste, both in the fresh and hardened state, and thus its rheology, mechanical properties, permeability, durability, and sustainability [6, 27]. The numerical values of w/c and w/b ratios are directly related to the distance between the particles in the hardened cement paste at the beginning of the hydration process and the space available for the formation of hydration products [6, 27]. According to work [9], the water/ cement ratio (w/c) of a hardened cement paste must be at least 0.42 to achieve complete hydration [9]. In a closed system, where there is no exchange with the environment, all the cement and water react to form cement gel and gel water, with 8 % of the volume formed as pores. If an external water source is present, the cement paste is also fully hydrated, but the pores formed are now filled with water. At a ratio greater than 0.42, the cement paste consists of the remaining capillary water, while at a ratio less than 0.42, hydration ceases due to the lack of water [9]. The water in the capillary pores has a positive effect by preventing self-desiccation and the occurrence of autogenous shrinkage, but has a negative effect on the mechanical properties, while unreacted cement particles improve the properties of the hardened cement paste as a hard inclusion with high compressive strength and high modulus of elasticity [12, 27]. At the mortar or concrete level, the amount, type, and distribution of aggregates also have some influence on the fresh and hardened properties, but less so on the hydration itself [28]. Gravity and environmental conditions affect the settling of solid particles and the bleeding of the corresponding water content depending on the w/c ratio and aggregate [29].

The course of hydration and its kinetics are influenced by numerous factors, such as the type, particle size distribution, and specific surface area of the cement, the amount of water, chemical and mineral admixtures, and temperature and humidity conditions [7, 27, 30]. Different types of cement are known depending on the additives, but all types of cement consist of four basic constituents: tricalcium silicate ( $C_3S$ ), dicalcium silicate ( $C_2S$ ), tricalcium aluminate ( $C_3A$ ) and tetracalcium aluminoferrite ( $C_4AF$ ) [12]. Since cement is a multiphase material, hydration occurs in a series of parallel chemical reactions with different kinetics [10, 12]. Hydration and structure development are dominated by the reactions of  $C_3S$  [10]. Silicates, which make up most of the volume of OPC, play an important role in hardening, i.e., in the rate of strength development:  $C_3S$  contributes to initial set and early strength gain, while  $C_2S$  contributes to later strength gain. Aluminate hydrates much more faster

than ferrite, but both contribute to space filling and chemical shrinkage as well as strength development [10, 24].

Paste hydration at ambient temperature is generally characterised by several phases: Pre- induction phase (first minutes), induction (dormant) phase (first few hours), acceleration phase (3 to 12 hours after mixing) and post- acceleration phase [11, 31]. Since hydration is an exothermic process, its progress can also be followed by the energy released in the form of heat. Data on the heat released by hydration are used to describe how the cement binds and hardens, and to estimate the temperature rise [11].

Monitoring the development of cement hydration is possible by testing calorimetry. Calorimetry is the measurement of heat and heat production rate most commonly used to study kinetics and extent of the hydration of cement and it is standardised by ASTM C1702 [32, 33]. Depending on the sample, we distinguish between isothermal calorimetry for small paste or mortar samples, semi-adiabatic calorimetry for larger concrete or mortar samples, fully adiabatic calorimetry for mass concrete, and solution calorimetry for samples 7 days and older [32]. In addition to sample differences, isothermal calorimeters measure thermal power (heat production rate), while (semi)adiabatic calorimeters measure temperature (change). Isothermal calorimetry is most often used in conjunction with other measurements such as ion concentration measurement, chemical shrinkage, internal relative humidity, XRD, TGA, and similar. Calorimetry also shows good correlation with the predictions of early age compressive strength and setting time [5, 34]. The initial setting time correlates well with the time at which the first derivative of the heat evolution curve  $[d(q)/d(t)]$  reaches its highest value, that is, the point at which the increase in the rate of heat generation is maximum, while the final setting time appears to correlate well with the time at which the first derivative is zero, or in other words the time at which the highest rate of hydration is achieved, Figure 2 [11, 35]. Although the work [27] concludes that laboratory testing of cement paste does not establish a reliable relationship between calorimetry and setting time, while the same relationship for mortar established a good correlation.

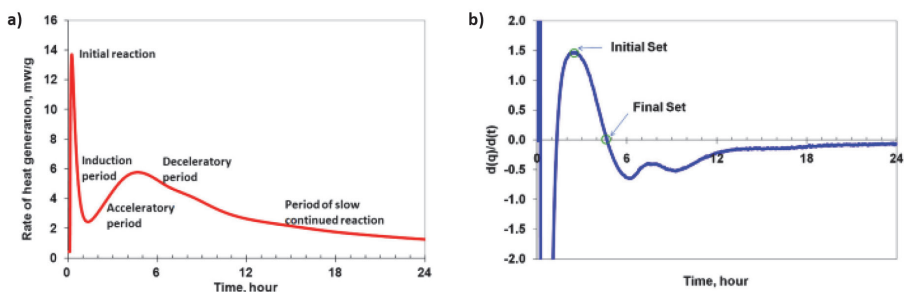


Figure 2. Graphical representation of the correlation between heat generation obtained with calorimetry and setting time; a) typical hydration curve, b) first derivative of heat generation rate [35]

Immediately after the binder comes into contact with water, the constituents rapidly dissolve and break down into ions-  $\text{OH}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}_2^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , etc [12]. Dissolution is visible in calorimetry as the first strong peak [10, 12]. The dissolution time of individual ions depends on their concentration, which in turn depends on the starting material and the presence of certain components in the cement [12]. In this way, the initial water passes into a solution with a certain concentration, which increases with time until supersaturation. The solution formed is defined as the alkaline solution present in the pores of the hardened cement. Ion concentration effects starting RH [20], while reduced alkali concentration in pore solution can result in retardation of the second exothermic peak [36]. The ion concentration for the same binder depends on the w/c ratio, i.e. on the amount of water by dilution or, if the w/c ratio is the same, on the composition of cement and additives. Over time, the actual concentration of the solution in the pores can be significantly affected by leaching, drying, or penetration of ions and other solutes [31].

Over a period of several hours, the speed of the process decreases, which may be caused by the type of cement or chemical and mineral additives [7]. The further reactions lead to the formation of a layer of C- S- H phase and ettringite, which is deposited on the cement particles [9,10]. Thereafter, there is a gradual acceleration of the process associated with setting when the formation of secondary C- S- H, portlandite, and ettringite begins [10]. The accelerated phase is accompanied by an increase in heat release and is therefore visible in calorimetry. This peak depends on cement type, water content and chemical and mineral additions [5]. The space occupied by the free water is now filled by the reaction with the hydration products, and if the filling does not occur, capillary voids are formed. The volume of capillary voids in hydrated hardened cement paste decreases with decreasing w/c ratio or increasing age. Crystalline structure of the hydration products is further tested with X- ray diffraction, while chemically bound water and pore volume and diameter are tested with thermogravimetry analysis and mercury intrusion porosimeter [32].

In addition to measuring the heat, the evolution of hydration can also be monitored with non- destructive methods, electrical resistivity and ultrasound. Electrical and ultrasonic methods can present the phenomena of percolation of solids or depolarization of water as an indicator of the critical time of transition from suspension to solid. The electrical response of the cement paste is an indicator of the development of its microstructure, when the process of development of resistivity is significantly influenced by the chemical and physical changes in the cement-water system [36]. The first stage is characterized by the first maximum of the rate, which is due to the dissolution of the cement grains; the second stage, which signifies the solidification, i.e., the formation of hydrates, and includes the initial and final setting times; and the third stage, in which the resistance continues to increase with increasing rate, corresponding to the conversion of AFt to AFm [36, 37]. As for the

ultrasonic measurements, the initial value of ultrasonic velocity after two hours is approximately 1500 m/s which is similar to the wave velocity through water [37]. Changes in velocity are determined as setting time.

After dormant period, the acceleration of the hydration process generates sufficient hydration products to promote the binding of the cement matrix and the formation of the initial structure [31]. As mentioned earlier, the newly formed matrix resists volume deformation and voids are formed. In addition to air voids, the pores are usually filled or nearly filled, except in the case of low  $w/c$ , which are subject to self-desiccation [6, 27]. The relationship between the formation of stresses,  $p_c$ , in the pores, their size and the relative humidity is described by the Laplace (1) and Kelvin (2) equations [16]:

$$p_c = -\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad (1)$$

$$p_c = -\frac{R \cdot T \cdot \ln(RH)}{V_m} \quad (2)$$

Where  $\sigma$  denotes the surface tension,  $\cos\theta$  the wetting angle,  $r$  the radius of the pore and  $R$  the gas constant and  $V_m$  the molar volume.

It has been shown that changes in internal relative humidity are a trigger for autogenous shrinkage and to have a major effect on behaviour [5, 16, 20, 38]. Another challenge is to study the pore distribution and size as well as the change in internal relative humidity. According to literature [20, 31, 32], mercury intrusion porosimetry (MIP) is still by far the most common method for estimating pore size distribution in cement pastes and concretes, but although it is simple enough to use, it is not the best pore representation due to certain limitations. The obtained results can be complemented by additional test like gas or water sorption, scanning electron microscopy image analysis or nuclear magnetic resonance [32]. In addition, the measurement of internal relative humidity can be affected by a large difference between the sample temperature and the ambient temperature, resulting in condensation and a false reading of the values [3,20]. Because of the sensitivity of the test methods, care should be taken when preparing specimens and performing the test, especially considering the temperature and humidity conditions of the room in which the test is performed.

## 4 Conclusion

Changes in the composition of cementitious materials, as well as the partial replacement of Portland cement with supplementary cementitious materials, whether reactive or inert, affect future cementitious properties due to changes in chemical structure and particle size distribution, as well as the hydration process and associated changes in microstructure formation. The effects range from changes in ion concentration in solution, to the hydration process, to the formation of structure and properties at later ages. All this affects the behaviour of the material in terms of volume deformation, especially autogenous shrinkage.

One of the most important cementitious material property is certainly setting time. Although the method for testing the initial and final setting is prescribed in the standard, there are still some divergences between values on different sample mixtures. However, there are several other ways to monitor the evolution of the microstructure and onset of setting. All of these changes can be accompanied by long-term destructive and non-destructive methods that, individually or in combination, provide a complete picture of the behaviour of the individual components. These tests allow a better understanding of the microstructure formation, which directly affects the behaviour of autogenous shrinkage, and determination of time zero.

Therefore, future testing and development of models to predict autogenous shrinkage behaviour must take into account these non-destructive long-term measurements in order to monitor the evolution of the structure as a function of the components used as correctly as possible. In this way, the obtained measurements and the predicted values will be related and comparable to the real elements.

## Acknowledgement

The research presented in this paper was carried out as part of the project “Cementitious composites reinforced with waste fibres – ReWire” (UIP-2020-02-5242) at the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb and funded by the Croatian Science Foundation.

## Literature

- [1] Sohail, M.G., Wang, B., Jain, A., Kahraman, R., Ozerkan, N. G., Gencturk, B., Dawood, M., Belarbi, A.: Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016, *Journal of Materials in Civil Engineering* 30 (2018) 04017310. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002144](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002144).
- [2] Fantilli, A. P., Józwiak-Niedźwiedzka, D.: Supplementary Cementitious Materials in Concrete, 2021. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-1482-6>.



- [3] Lu, T., Li, Z., Huang, H.: Effect of supplementary materials on the autogenous shrinkage of cement paste, *Materials (Basel)*. 13 (2020) 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma13153367>.
- [4] Iitim, A., Ezziane, K., Kadri, E.H.: Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3603–3609. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.055>.
- [5] De La Varga, I., Castro, J., Bentz, B., Weiss, J.: Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash, *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 1001–1008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.008>.
- [6] Aïtcin, P.C.: The importance of the water-cement and water-binder ratios, *Sci. Technol. Concr. Admixtures*. (2016) 3–13. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00001-1>.
- [7] Marchon, D., Flatt, R.J.: Impact of chemical admixtures on cement hydration, Elsevier Ltd, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00012-6>.
- [8] Holt, E.: Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.009>.
- [9] Aïtcin, P.C.: Phenomenology of cement hydration, Elsevier Ltd, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00002-3>.
- [10] Marchon, D., Flatt, R.J.: Mechanisms of cement hydration, Elsevier Ltd, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00008-4>.
- [11] Paine, K.A.: Physicochemical and mechanical properties of Portland cements, 5th ed., Elsevier Ltd., 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00007-1>.
- [12] Aïtcin, P.C.: Portland cement, Elsevier Ltd, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5>.
- [13] Fu, T.: Autogenous Deformation and Chemical Shrinkage of High Performance Cementitious Systems, Oregon State University, 2011.
- [14] Huang, H., Ye, G.: Examining the “time-zero” of autogenous shrinkage in high/ultra-high performance cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 97 (2017) 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.010>.
- [15] Li, L., Dabarera, A.G.P., Dao, V.: Time-zero and deformational characteristics of high performance concrete with and without superabsorbent polymers at early ages, *Constr. Build. Mater.* 264 (2020) 120262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120262>.
- [16] Chang-wen, M., Qian, T., Wei, S., Jia-ping, L.: Water consumption of the early-age paste and the determination of “time-zero” of self-desiccation shrinkage, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1496–1501. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.005>.

- [17] Sant, G., Lura, P., Weiss, W.J.: A discussion of analysis approaches for determining 'time-zero' from chemical shrinkage and autogenous strain measurements in cement paste, in: *Int. RILEM Conf. Vol. Chang. Hardening Concr. Test. Mitig.*, 2006: pp. 375–383.
- [18] Darquennes, A., Staquet, S., Espion, B.: Determination of time-zero and its effect on autogenous deformation evolution, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 15 (2011) 1017–1029.
- [19] Tenório Filho, J.R., Gomez de Arujo, M.A.P.: Discussing Different Approaches for the Time-Zero as Start for Autogenous Shrinkage in Cement Pastes Containing Superabsorbent Polymers, *Materials (Basel)*. 12 (2019).
- [20] Zhang, Y., Ouyang, X., Yang, Z.: Microstructure-based relative humidity in cementitious system due to self-desiccation, *Materials (Basel)*. 12 (2019) 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma12081214>.
- [21] Zhang, J., Hou, D., Han, Y.: Micromechanical modeling on autogenous and drying shrinkages of concrete, *Constr. Build. Mater.* 29 (2012) 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.022>.
- [22] Wu, L., Farzadnia, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H.: Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review, *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.064>.
- [23] Do, Q.H.: *Modelling Properties of Cement Paste from Microstructure: Porosity, Mechanical Properties, Creep and Shrinkage*, EPFL, 2013.
- [24] Yodsudjai, W., Wang, K.: Chemical shrinkage behavior of pastes made with different types of cements, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 854–862. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.053>.
- [25] Tazawa, E.: Japan Concrete Institute (JCI), *Autogenous shrinkage of concrete*, in: E & FN Spon, 1999.
- [26] ASTM C1698-19, *Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*, (2019).
- [27] Bentz, D.P., Peltz, M.A., Winpigler, J.: Early-Age Properties of Cement-Based Materials . II : Influence of Water-to-Cement Ratio, 21 (2010) 512–517.
- [28] Tasong, W.A., Lynsdale, C.J., Cripps, J.C.: Aggregate-cement paste interface. ii: influence of aggregate physical properties, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 1453–1465. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00126-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00126-4).
- [29] Bentz, D.P.: A review of early-age properties of cement-based materials, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.005>.
- [30] Bentz, D.P., Sant, G., Weiss, J.: Early-Age Properties of Cement-Based Materials. I: Influence of Cement Fineness, *J. Mater. Civ. Eng.* 20 (2008) 502–508. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:7\(502\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:7(502)).

- [31] Diamond, S.: Physical and chemical characteristics of cement composites, *Durab. Concr. Cem. Compos.* (2007) 10–44. <https://doi.org/10.1533/9781845693398.10>.
- [32] Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B.: *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, 2016.
- [33] ASTM C1702 Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry, (2017).
- [34] Vishavkarma, A., Harish, K.V.: Using Isothermal Calorimetry to Predict Setting Time of Cement-Based Materials (CBMs) BT - Recent Advancements in Civil Engineering, in: B. Laishram, A. Tawalare (Eds.), Springer Singapore, Singapore, 2022: pp. 341–349.
- [35] Hu, J., Ge, Z., Wang, K.: Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 657–663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011>.
- [36] Yousuf, F., Wei, X., Zhou, J.: Monitoring the setting and hardening behaviour of cement paste by electrical resistivity measurement, *Constr. Build. Mater.* 252 (2020) 118941. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118941>.
- [37] Yim, H.J., Bae, Y.H., Jun, Y.: Hydration and microstructural characterization of early-age cement paste with ultrasonic wave velocity and electrical resistivity measurements, *Constr. Build. Mater.* 303 (2021).
- [38] Hu, Z., Wyrzykowski, M., Scrivener, K., Lura, P. : Prediction of autogenous shrinkage of cement pastes as poro-visco-elastic deformation, (2019) 105917.

# Pregled stanja područja zgrada u blokovima i metoda konstrukcijskog ojačanja s osvrtom na karakteristike grada Zagreba

Jakov Oreb<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Josip Atalić<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

Zgrade u blokovima i nizovima dio su tipične arhitekture povijesnog centra grada Zagreba, kao i mnogih središta gradova diljem Europe. Potres u Zagrebu (ožujak 2020.), kao i nedavni potresi u Italiji, ukazali su na međudjelovanje stambenih jedinica i njihovo kompleksno ponašanje pri potresnom djelovanju. Literatura, norme i propisi u ovom dijelu još uvijek ne daju jasne upute. Prikazan je pregled eksperimentalnih i numeričkih metoda iz dostupne literature koji analiziraju međusobni utjecaj zgrada u blokovima s osvrtom na karakteristike grada Zagreba. Naglasak je na numeričkom modeliranju i prijedlogu metoda sanacije i protupotresnog ojačanja blokova kao cjeline, kao i analiza trenutne inženjerske prakse.

*Glavne riječi: potresno inženjerstvo, numeričko modeliranje, zgrade u blokovima, zidane konstrukcije, metode sanacije i protupotresnog ojačanja, tipska ojačanja*

## State of the art of the masonry building aggregates and retrofit strategies with emphasis on the City of Zagreb

### Abstract

Buildings aggregates are part of the typical architecture of the historical City center of Zagreb, along with many other city centers throughout Europe. The earthquake in the City of Zagreb (March 2020), and recent earthquakes in Italy, suggested the interaction of structural units within aggregate, and their complex behavior during earthquakes, including seismic pounding. Literature, current norms, and regulations for this problem still do not provide clear instructions. An overview of experimental and numerical methods from the available literature that analyze the mutual influence of buildings in aggregates regarding the characteristics of the City of Zagreb is presented. The emphasis is on unreinforced masonry structures numerical modeling and retrofitting strategies and interventions for the whole aggregate, and analysis of current engineering practice in Croatia.

*Key words: earthquake engineering, numerical modelling, building aggregates, masonry structures, retrofitting strategies, typical retrofitting interventions*

## 1 Uvod

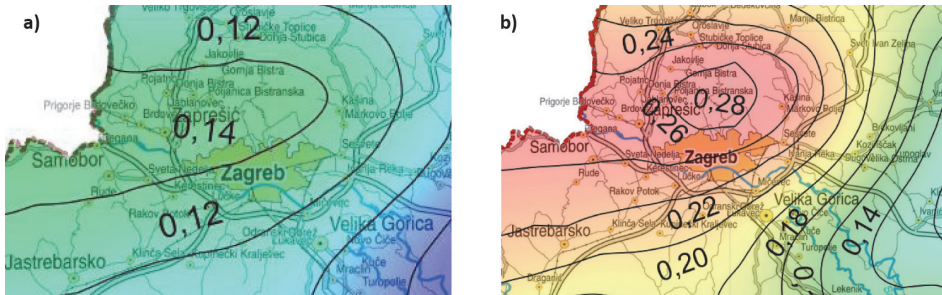
U ožujku 2020. godine Zagreb je pogodio potres magnitude 5,5. Nakon Zagrebačkog uslijedio je potres u Petrinji u prosincu iste godine, magnitude 6,2. Posljedice oba potresa vidljive su i dan danas, dvije godine nakon. Zadatak građevinske struke je ponuditi ispravne modele obnove kako bi se posljedice budućih potresa smanjile na minimum. Jedno od prepoznatih područja za koja je potrebno ponuditi rješenje inženjerskoj praksi su zgrade u blokovima u tradicijskoj jezgri grada Zagreba.

Pod pojmom potres se najčešće smatra iznenadno oslobađanje nakupljene (elastične) potencijalne energije u Zemljinoj unutrašnjosti (kori) u obliku potresnih valova i topline. Prirodna je katastrofa koju je gotovo nemoguće predvidjeti i spriječiti, ali se sigurno može očekivati s određenom vjerojatnošću na cijelom teritoriju Zemlje [1]. Međutim, pogrešno je pretpostaviti da opasnost od djelovanja potresa predstavlja jedino intenzitet potresnog opterećenja na lokaciji. "Ubija građevina, ne ubija potres" iskustvena je tvrdnja koja je postala uvriježena među građanima i inženjerima i ima svoje uporište u povijesnim događajima tijekom potresa. Kao potvrda ove tvrdnje javlja se pojam potresni rizik koji je opsežniji i daje potpuniju informaciju po pitanju sigurnosti u slučaju potresa. Potresni rizik određuje (i) potresna opasnost (hazard) koja proizlazi iz potresne aktivnosti područja, (ii) potresna izloženost (na primjer naseljenost), (iii) potresna oštetljivost uvjetovana karakteristikama koncepcije, konstrukcije, materijala, kvalitete građenja i vremena gradnje, a direktni utjecaj ima nekontrolirana rekonstrukcija [2]. Potresni rizik grada Zagreba je vrlo velik zbog umjerenog do visokog potresnog hazarda, velike izloženosti (guste naseljenosti – 19,8 % stanovništva RH [3] i preko 65.000 studenata koje broji Sveučilište u Zagrebu [4], kulturnog nasljeđa i važnosti grada – gospodarski, kulturni, znanstveni i upravni centar RH) i velike oštetljivosti (zbog nepovoljnog koncepta nosive konstrukcije, starosti, lošeg održavanja, nezakonitih izvedbi i rekonstrukcija). Gradska četvrt Donji grad, iako zauzima svega 0,5 % površine grada, značajno doprinosi riziku, prvenstveno zbog fonda zgrada sa nepovoljnim svojstvima (tradicijska gradnja) i velike gustoće naseljenosti.

Na području RH potresni hazard je definiran važećom kartom potresnih područja [5], prema kojoj se u Zagrebu mogu očekivati vršna ubrzanja tla na osnovnoj stijeni u rasponu od 0,20 do 0,28 g (slika 1), za povratno razdoblje od 475 godina.

Potresna izloženost postojećeg fonda građevina u centru grada, je zbog niza uzroka poput lošeg održavanja, mnogobrojnih nelegalnih i nedokumentiranih rekonstrukcija, manjka dokumentacije i izgradnje bez korištenja normi za potresno projektiranje i izvođenje izrazito naglašena. To ne znači da te zgrade nemaju nikakvu otpornost na djelovanje potresa, već da je potrebno posvetiti više vremena analizi postojećeg stanja, izradi adekvatne dokumentacije i rekonstrukcije, što je jedan od ciljeva ovog rada. Ovaj rad se stoga detaljno posvetio baš tim zgradama unutar gradskog centra

s naglaskom na zgrade u blokovima i nizovima. Položaj zgrade u bloku, uz ranije navedene parametre ima velik utjecaj na potresnu oštetljivost, na način da najveću oštetljivost prema preliminarnim analizama baze podataka pokazuju jedinice koje se nalaze na kraju niza, dok položaj jedinice između dvije ili, idealnom slučaju između 3 jedinice ima pozitivan utjecaj. [6] Istu tvrdnju potvrđuje i rad koji proučava potresnu oštetljivost zgrada u Osijeku [7], i uz to dodatno kvantitativno obrađuje i utjecaj visine susjednih zgrada te ukazuje na to da viša zgrada povoljno utječe na nižu, a niža susjedna zgrada nepovoljno na višu zgradu.



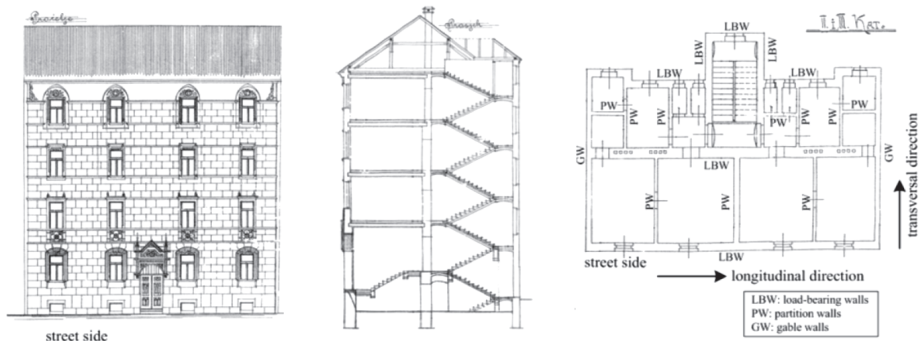
Slika 1. Horizontalna vršna ubrzanja tla za Zagreb i okolicu a) povratno razdoblje 95 godina, b) povratno razdoblje 475 godina [5]

Gradska jezgra Zagreba, kao i mnoga povijesna gradska središta diljem Europe, stoljećima se razvijala i zgušnjavala, iako je veliki dio obnovljen nakon razaranja zagrebačkog potresa 1880. godine. Ova rekonstrukcija rezultirala je karakterističnim velikim blokovima tradicijskih zidanih zgrada (slika 2) koje oblikuju gradsko središte Zagreba [8]. Svaka ulična strana bloka sastoji se od pet ili više zgrada različitih dimenzija, obično ukupne tlocrtna dimenzije oko 100 x 50 m (dimenzija s ulične strane). Ukupna bruto izgrađena površina u povijesnoj jezgri grada iznosi oko 5,2 km<sup>2</sup>, od čega je tlocrtna površina zgrada oko 1,2 km<sup>2</sup>. Blokovi ponekad sadrže i neplanski izgrađene anekse [9]. Povremeno postoji razmak između dva niza zgrada koje mogu služiti raznim namjenama, poput prolaza vatrogasnog vozila i/ili automobila.



Slika 2. Tlocrtni pogled na tri zagrebačka bloka [9]

Nosiva konstrukcija zgrada u blokovima razlikuje se ovisno o položaju unutar bloka (kutna ili srednja zgrada ili na kraju niza). Ukoliko pričamo o tipičnoj zgradi unutar niza (slika 3), ona se obično sastoji od tri nosiva uzdužna zida paralelna s ulicom (debljine 30 – 60 cm, zidani od pune opeke) i nekoliko pregradnih zidova okomitih na njih debljine 15 cm. Međukatna konstrukcija iznad podruma obično je izvedena kao zidani bačvasti svod (ponekad i kao armiranobetonska ploča), a ostali katovi su izvedeni od drvenih greda oslonjenih na uzdužne zidove povezane sa dva sloja drvenih dasaka. Ovi sustavi drvenih podova su vrlo teški, jer je slobodni prostor između greda ispunjen "šutom". Mnoge zidane zgrade zagrebačkih blokova nisu bili primjereno održavane, uporabni vijek im je istekao, a ta činjenica, zajedno s mnogostrukim modifikacijama na konstrukciji zgrade u periodu od izgradnje do danas, negativno su utjecale na potresnu otpornost konstrukcije. Na primjer, vanjski zidovi prizemlja često su bili djelomično ili čak potpuno uklonjeni zbog postavljanja izloga. Slično, unutarnji konstrukcijski (nosivi) i pregradni zidovi u gornjim etažama ponekad su uklanjani kako bi se dobio prostor, ostavljajući vanjski zidovi bez potpore izvan ravnine [9].

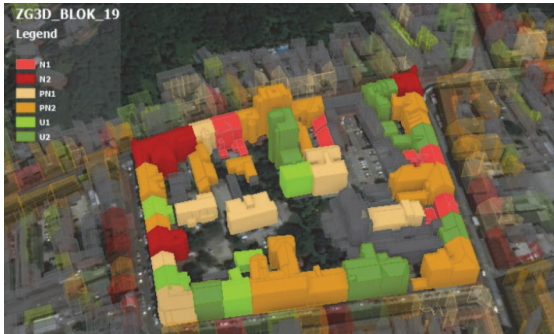


Slika 3. Pogled na fasadu, poprečni presjek i karakteristični tlocrt primjera zgrade u bloku [9]

Ukoliko se napravi osvrt na rezultate pregleda oštećenja i procjene uporabljivosti povijesnih zidanih zgradama u blokovima u odnosu na prosječno pregledane zgrade pokazale su se ranjivijima, pri čemu je je 59 % pregleda označeno zelenom (uporabljive), 34 % žutom (privremeno neuporabljive), a 7 % crvenom (neuporabljiva) oznakom (slika 4). Zanimljivo je istaknuti i da su zgrade u uglovima blokova, koje se po istraživanjima smatraju ranjivijima, imale slične omjere i stoga nisu bile ranjivije od zgrada u nizu u Zagrebu (zeleno: 58 %, žuta: 34 %, crvena: 8 %). Loš učinak ovih povijesnih zidanih zgrada može se pripisati prvenstveno nedostatku nosivih zidova u poprečnom smjeru i fleksibilnim drvenim međukatnim konstrukcijama koje nisu mogle osigurati prijenos horizontalnog opterećenja poput dijafragme. Dodatni razlozi lošeg odgovora mogu biti pronađeni u lošijoj kvaliteti materijala (posebno morta degradiranog atmosferilijama), "slabijim" parapetima između nosivih zidova



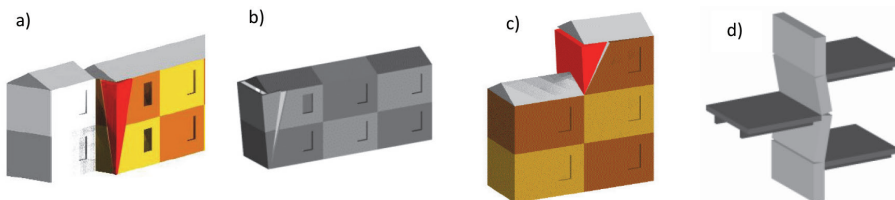
(manje debljine od nosivog zida), kao i slabe veze fleksibilne međukatne konstrukcije i pregradnih zidova sa nosivim zidovima[10].



Slika 4. Uporabljivost zgrade na jednom primjeru građevinskog bloka. Zelena je upotrebljiva, žuta je privremeno neupotrebljiva, a crvena je neupotrebljiva [11]

## 2 Analiza tehničke regulative, pripadnih normi i inženjerske prakse

Ponašanje zgrada u blokovima pri djelovanju potresa, različito je od ponašanja samostojećih zgrada, zbog utjecaja međudjelovanja sa susjednim zgradama što uzrokuje modificiranje rubnih uvjeta, opterećenje i mehanizme kolapsa (slika 5.) konstrukcijskih jedinica (skraćeno K.J.) [12]. Međutim, ova činjenica još uvijek nema utjecaj na trenutno stanje prakse u RH, gdje su zahvati potresnog ojačanja ili izgradnje novih građevina projektirani i izvođeni kao da se radi o samostojećim zgradama, najčešće bez analize utjecaja na susjedne zgrade i međusobnog međudjelovanja.



Slika 5. Prikaz mehanizama kolapsa zgrada unutar blokova/nizova: a) Tlocrtno izmaknuta fasada dovodi do slučaja zabatnog zida koji nije pridržan susjednom zgradom; b) K.J. na početku ili na kraju niza nije pridržan sa susjednom zgradom; c) Susjedne K.J. različite visine. Sudaranje može uzorkovati otkazivanje više zgrade; d) Međukatne konstrukcije na različitoj visini kod susjednih K.J. Potresno opterećenje može uzrokovati sudaranje na razini međukatne konstrukcije i otkazivanje zidova izvan ravnine [12]

Trenutna praksa i zakonska regulativa je u kontrastu sa znanstvenim istraživanjima na ovu temu i inženjerskoj praksi u drugim zemljama Europe i Svijeta (npr. Italija), koje smatraju takav pristup pogrešnim [13] i pravno obvezuju projektiranje i izvedbu



zgrada u bloku i/ili nizu kao cjeline. Dodatno, regulativni i normativni okvir za ojačanje postojećih zgrada i izgradnju novih zgrada je pretežito formiran za samostojeće zgrade, dok je nedostatak po pitanju detaljnih uputa za projektiranje zgrada u blokovima manjkav.

## 2.1 Eurokod 8 i Hrvatski propisi za projektiranje zgrada u nizovima/blokovima

Budući da je trenutno u razvoju nova generacija Eurokoda, prikazani su podaci iz zadnje dostupne *draft* verzije Eurokoda 8 (EC8), kako bi se uvidjeli i prezentirali dijelovi koji se odnose na zgrade u blokovima. Pregledom postojećeg, ali i novog EC8, zaključeno je da propisuje potrebu za uključivanjem međudjelovanja susjednih građevina, ali ne daje konkretne smjernice kako ih definirati. EC8 – Dio 1-1 [14] definiran je pojam “dinamički neovisne jedinice” (paragraf 3.1.11.) kao konstrukciju ili njezin dio izravno izložen gibanju temeljnog tla na čiji odziv ne utječe odziv susjednih jedinica ili konstrukcija. Da bi se konstrukcija smatrala dinamički neovisnom, po EC8 – Dio 1-2 [15], dodatno su definirane minimalne dimenzije potresne razdjelnice (točka 6.2.10.) između dviju konstrukcija kao funkcija horizontalnog pomaka zgrade i katne visine zgrade ili neovisne jedinice; ukoliko ovaj zahtjev nije ispunjen, tada jedinice se smatraju da nisu dinamički neovisne [8]. EC8 – Dio 3 [16] ističe se činjenica da je norma namijenjena ocjeni i proračunu postojećih samostojećih konstrukcija, točnije u situacijama kako je konstrukcija dinamički neovisna o susjednim, ili gdje se međudjelovanje može zanemariti. Prilikom numeričkog modeliranja, postoji također obaveza uzimanja u obzir, numeričkim metodama, potencijalni utjecaj susjednih konstrukcija preko ekvivalentnih rubnih uvjeta i/ili dodatne mase, ali nije detaljno opisano na koji način takva međudjelovanja trebaju biti modelirana (točka 6.2.1. i 7.), te nisu navedene dodatne informacije (točka 0.3, 11.2.1 (g), 11.3.3). Nizom mjerodavnih normi EC 8, po pitanju problematike blokova, zaključuje se da međudjelovanja trebaju biti uzeta u obzir, ali detaljne smjernice na koji način, trebaju biti obuhvaćene, nisu navedene. Dodatno, prema dosadašnjim saznanjima, konstrukcijske jedinice tradicijskih blokova/nizova u Zagrebu su razdvojene razdjelnicama koje nisu adekvatne (zgrade su priljubljene jedna uz drugu) prema EC 8 – Dio 1-2 [15], što znači da se one ne bi smjele smatrati niti analizirati kao dinamički neovisne jedinice. Tehničkim propisom o izmjenama i dopunama tehničkog propisa za građevinske konstrukcije [17], definirane su razine obnove, ali također bez posebnog naglaska na zgrade u blokovima. Tijekom rekonstrukcije, zgrada se ojačava u postojećim gabaritima, što znači da potresna razdjelnica ostaje dimenzije kao i u postojećem stanju, kao i rubni uvjeti unutar agregata. Posljedično, rješenje za pojačanje konstrukcije ili njenu cjelovitu obnovu može promijeniti masu i krutost svake zgrade zasebno bez ukupne analize potencijalnih štetnih učinaka na susjedne zgrade unutar bloka ili niza. Štoviše, uobičajeno je da susjedne zgrade imaju različite projektante koji

ne usklađuju projektna rješenja po pitanju dinamičkih parametara. Razlozi takvoj praksi mogu biti i imovinsko/pravni problemi, budući da vlasnici zgrada u Hrvatskoj nisu obvezni ojačati zgrade u blokovima i nizovima kao cjeline, već je svaki vlasnik odgovoran samo za svoju jedinicu unutar bloka/niza.

## 2.2 Izgradnja novih građevina unutar blokova

U centru grada Zagreba, gotovo svaki blok ima minimalno jednu modernu zgradu koja je izgrađena na mjestu gdje prije zgrade nije bilo, ili na mjestu postojeće zgrade koja je uklonjena. Moderne zgrade pretežito su izvedene kao armiranobetonske ili zidane omeđenim žiđem, a ponekad možemo vidjeti i primjere kada potresna razdjelnica ne postoji. Ukoliko razmak između građevina ipak postoji, on je najčešće ispunjen toplinskom izolacijom (npr. ekstrudiranim polistirenom, XPS) debljine oko 10 cm, da bi se izbjeglo nakupljanje prljavštine i/ili životinja unutar razdjelnice (slika 6.). Polistiren ima značajnu tlačnu čvrstoću i kao takav ne smanjuje sudaranje, već prenosi potresne sile između susjednih zgrada. [18] Iz svega navedenog može se pretpostaviti da izgradnja nove zgrade koja mijenja novu unutar bloka ili niza, može nepovoljno utjecati na susjedne građevine.



Slika 6. Primjer izgradnje moderne zidane i armiranobetonske zgrade unutar Zagrebačkog bloka (fotografirano 4. ožujka 2022.) – a) razdjelnica ispunjena toplinskom izolacijom; b) bez razdjelnice

## 2.3 Strana praksa – primjer talijanskih normi i propisa za projektiranje zgrada u blokovima

Italija je u posljednje vrijeme, pogođena brojnim potresima (Molise, 2002.; L'Aquila, 2009.; Središnja Italija, 2016.), razvila mnogo smjernica i propisa za rješavanje problema rekonstrukcije zgrada u blokovima i prepoznata je kao vodeća zemlja u svijetu po dostupnosti propisa u tom području. Nakon potresa u L'Aquili, zgrade unutar povijesnih središta, uglavnom građene u blokovima, ojačane su kasnije u odnosu na zgrade izvan blokova [19]. Pilot-projekt je definiran na način da su zgrade podijeljive u blokove, te je analizirano konstrukcijsko ponašanje "imaginarnog" bloka. Za-

datak i odgovornost projekatana je bila da utvrde koje su manje jedinice (blokovi/nizovi) zajedno reagirale na isto potresno djelovanje. Iz ovog pilot projekta razvili su i smjernice za analizu, projektiranje i obnovu zidanih zgrada u blokovima/nizovima. Prema Talijanskom pravilniku br. 19/2017 [20] za obnovu nakon potresa 2016., lokalna samouprava može identificirati blokove/nizove na temelju potresnih međudjelovanja zgrada. Kada lokalna samouprava identificira blokove, budući radovi projektiranja i izvođenja moraju se provesti za blok kao cjelinu. Ako općina ne identificira agregate, još uvijek se može uspostaviti konzorcij za projektiranje i izvođenje radova na blokovima. Za vrlo velike blokove ili nizove, moguće je smanjiti broj zgrada u globalnom modelu, ali ne na manje od tri zgrade. Konačno, jedinice lokalne samouprave imaju moć zamjene kada vlasnici ne poduzmu ništa. Razlika u odnosu na blokove u Zagrebu, koji su predmet ovog projekta, je arhitektura i veličina bloka, te odvojenost jedinica budući da se u Italiji, na primjerima zgrada oštećenih u navedenim potresima, blok ili niz sastoji od manjeg broja zgrada koje na kontaktima u većini slučajeva imaju zajedničke zidove.

### **3 Pregled dosadašnjeg znanstvenog doprinosa po pitanju zgrada u blokovima**

#### **3.1 Pregled eksperimentalnog znanstvenog istraživanja i rezultata**

Dosadašnje znanstveno eksperimentalno istraživanje po pitanju blokova u velikom mjerilu, ograničeno je na svega nekoliko ispitivanja u mjerilu 1:2. Uzroci tako malom broju testova se mogu potražiti u kompleksnosti i cijeni ispitivanja na potresnim stolovima, kao i kapacitetu potresnih stolova zbog težine uzoraka. Oba poznata testiranja provedena su na dvije susjedne zgrade različite visine sa zidom od kamenog materijala (*engl. stone masonry*). Prvim testom, u EUCENTRE laboratoriju, Pavia [21], obrađeno je ponašanje susjednih zgrada u njihovom izvornom, neojačanom stanju, te kasnije i u rekonstruiranom, ojačanom stanju. Budući da su jedinice bile međusobno povezane na kontaktu segmentima kamena i međukatnom konstrukcijom na razini podova, izostalo je potpuno odvajanje i sudaranje pri testiranju, koje bi se, prema tipologiji (poglavlje 1.) za Zagreb očekivalo. Drugo ispitivanje, u laboratoriju LNEC, Portugal [22,23] obradilo je problem potpuno razdvojenih konstrukcijskih jedinica, povezanih jedino tankim slojem morta. Iskustvo iz ovog eksperimenta potvrdilo je utjecaj međudjelovanja na kontaktu između jedinica na ponašanje jedinica i naglasilo potrebu za ispravnim modeliranjem tog međudjelovanja. Iako istraživanja nisu provedena na tipologiji zgrada u Zagrebu (poglavlje 1.) i samim tim rezultati ne mogu poslužiti kao reprezentativni i za Zagrebačke blokove, eksperimentalno je potvrđeno da međudjelovanje postoji.

## 3.2 Pregled numeričkog znanstvenog istraživanja i rezultata

Više je istraživača modeliralo ponašanje blokova primjenjujući razne metode i pristupe, stoga se može reći da unificirana metodologija nije pronađena. Odabir ispravnog načina modeliranja predstavlja ključnu točku kod analize postojećeg stanja i rekonstrukcije, budući da pojednostavljeni pristup modeliranju veze između jedinica može potpuno krivo procijeniti mehanizam otkazivanja građevine [24]. U RH je međusobno sudaranje građevina analizirano za nekoliko građevina kritične infrastrukture. [18] Dobiveni parametri povećanja unutarnjih sila implementirani su u obrazac za preliminarnu procjenu potresne oštetljivosti povezanih zgrada. [25] Procjena oštetljivosti više zgrada također je provedena na većem broju zgrada u gradu Osijeku [7], a u procjenu su uključeni i parametri vezani za zgrade u blokovima. Konkretno, na zidanim zgradama donjogradskih blokova grada Zagreba dosad nisu provedena konkretna numerička ispitivanja, niti numerički analizirane mjere ojačanja. Generalne upute za ojačanja dana su "Programom cjelovite obnove povijesne jezgre grada Zagreba" [26] te su analizirane i korištene kao ulazni parametri za izradu metodologije u ovom radu. U svijetu, u odnosu na RH postoji veći broj znanstvenih radova na ovu temu, pogotovo u posljednjih 10 godina, što govori o njenoj aktualnosti. Za Zagreb je nužno razviti poseban pristup i metodologiju obzirom na specifičnu arhitekturu i rezultate otkazivanja koji su nastali nakon nedavnih potresa 2020. Budući da se arhitektura i principi gradnje razlikuju, neki od pregledanih radova su primijenili pojednostavljenja koja, za Zagreb neće vrijediti, stoga nisu detaljnije opisana u nastavku. Proučavanjem blokova i inženjerske prakse te strane prakse zaključeno je da se radi o odvojenim jedinicama koje imaju odvojeni susjedni zid (poglavlje 1.) i zbog toga može nastupiti sudaranje. Dinamički odziv stoga uzima u obzir posljedice sudaranja koje se promatraju za tri različita modela: (i) Model s modeliranom nelinearnom vezom između jedinica, (ii) model s nezavisnim jedinicama, (iii) model s potpuno povezanim jedinicama. [23] Temeljem rezultata na detaljnom numeričkom modelu potrebno je uvesti pojednostavljena za svakodnevnu praksu, kao jedan od zaključaka. Naime, zbog vremenskog i financijskog okvira, ali i nedostupnosti podataka, kod praktične primjene često nije moguće modelirati više samostalnih zgrada u nizu. U takvim slučajevima često pribjegava modeliranju izoliranih jedinica, ali pristup koji unosi manju grešku u proračun jest uz modeliranje djelovanja ostalih jedinica pomoću jednostavnih jednodimenzionalnih elemenata koji mogu biti kalibrirani na osnovi osnovnih geometrijskih parametara ili pak parametara koji mogu biti procijenjeni već uz osnovni vizualni pregled. [6] Postoje rješenja koja predlažu jednodimenzionalne elastoplastične veze u poprečnom smjeru (dok su veze u uzdužnom smjeru izostavljene) između jedinica s čvrstoćom  $R$  i krutošću  $K$  u ovisnosti o visini etaže, ukupnoj duljini niza zgrade u koeficijentima  $\alpha$  i  $\beta$  koji uzimaju u obzir poziciju jedinice u nizu. [27] Jasno je, pogledavši sliku 2, da

bi za Zagreb bila potrebna kalibracija elemenata veza u uzdužnom smjeru, koja bi svakako bila dosta zahtjevna [28], te bi u tom slučaju vjerojatno bilo bolje odlučiti se i na modeliranje susjednih jedinica. Potencijalno dobar pristup za Zagrebačke blokove je pristup modeliranju dijelova ostalih jedinica pomoću linearno elastičnih ili nelinearnih elemenata na spojevima s ostalim građevinama, koje je moguće generirati modalnom analizom susjednih jedinica[29].

#### **4 Rasprava i prijedlog metodologije za analizu i rekonstrukciju zgrada u blokovima**

U nastavku su raspravljene hipoteze i predložena je metodologija za analizu postojećeg stanja, sa ishodima analiza i prijedlog rekonstrukcije zgrada unutar blokova. Prema iskustvima tijekom potresa u Zagrebu i Petrinji 2020. godine, stranoj literaturi i tehničkim propisima, može se razmišljati u smjeru rekonstrukcije blokova kao cjelina, te potencijalno pogrešnim smatrati pristup uvriježen u inženjerskoj praksi o rekonstrukciji zgrade unutar bloka kao pojedinačne cjeline (*engl. standalone building*). Dodatno, izgradnja novih zgrada unutar blokova, bez prikladne potresne razdjelnice može negativno utjecati na potresnu oštetljivost zgrada u bloku.

Kao ulazni podatak za (i) definiranje potresnog hazarda uz upotrebu snimljenih potresnih zapisa pri Zagrebačkom potresu; (ii) usvajanje eksperimentalno utvrđene čvrstoće зида [30]; (iii) eksperimentalno utvrđivanje dinamičkih parametara zgrade (*engl. Operational Modal Analysis – OMA*) s naglaskom na lociranje međudjelovanja; (iv) izrada numeričkog modela i kalibracija sa točkom (iii) i oštećenjima utvrđenim pri potresu 22. ožujka 2020. u Zagrebu; (v) utvrđivanje krutosti nelinearne veze između jedinica; (vi) utvrđivanje oblika kolapsa; (vii) modeliranje niza zgrada unutar bloka zbog utvrđivanja broja zgrada u nizu na središnju jedinicu, kako bi se odredio broj zgrada koje zajedno idu u rekonstrukciju; (viii) analiza utjecaja krute susjedne zgrade bez adekvatne potresne razdjelnice na ponašanje zgrada u bloku/nizu; (ix) analiza utjecaja sanirane i protupotresno ojačane susjedne zgrade na ponašanje zgrada u bloku/nizu; (x) Prikaz tipskih metoda ojačanja za blokove kao cjeline.

#### **5 Zaključak**

Cilj ovog rada bilo je dati pregled stanja područja zgrada u blokovima i metoda konstrukcijskog ojačanja s naglaskom na karakteristike arhitekture i načina gradnje u gradskoj jezgri Zagreba. Obzirom na izražen rizik od potresa grada Zagreba, manjkavost tehničkih propisa po pitanju analize blokovske gradnje i trenutnu inženjersku praksu u RH koja nije u skladu sa stranim propisima i zaključcima znanstvenih istraživanjima, potrebno je ponuditi ispravne modele obnove kako bi se posljedice

budućih potresa smanjile na minimum. Nedoumice proizašle iz različitosti i posebnosti Zagrebačke arhitekture i principa gradnje, potrebno je dokazati i kvantificirati na analiziranim primjerima i tako potvrditi definirane hipoteze. Ciljevi daljnjeg rada na području trebali bi biti posvećeni smanjenju potresnog rizika kompletnog bloka i niza, a ne samo individualne građevine uz dodatno razvijanje načina ojačanja predmetnih zgrada na način da primijenjene intervencije budu prihvatljive po pitanju djelovanja na vrijednost kulturne baštine kojoj pripadaju.

## Literatura

- [1] Dasović, I., Herak, M., Prevolnik, S.: Uvodno o potresu i njegovim učincima (poglavlje), Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 13-36, 2020.
- [2] Zamolo, M., Grandić, D.: Tehnička regulativa za projektiranje potresne otpornosti i za obnovu nakon potresa – smjernice i upute za provedbu obnove (poglavlje), Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 123-164, 2020.
- [3] Grad Zagreb – službene stranice – Popis stanovništva, kućanstava i stanova – Popis 2021. – prvi rezultati, <https://www.zagreb.hr/popis-stanovnistva-kucanstava-i-stanova/1043>, pristup: 11.06.2022.
- [4] Agencija za znanost i visoko obrazovanje – Broj studenata prema ustanovi izvođača, Sveučilišta u Zagrebu, Splitu, Osijeku i Rijeci (2013/14 – 2018/19), <https://www.azvo.hr/hr/visoko-obrazovanje/statistike/2113-broj-studenata-prema-ustanovi-izvodaca-sveucilista-u-zagrebu-splitu-osijeku-i-rijeci-2013-14-2017-18>, pristup: 11.06.2022.
- [5] Herak, M., Allegreti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I.: Republic of Croatia, Seismic hazard map, 2011. <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>, pristup: 11.06.2022.
- [6] Tomić, I.: Utjecaj gradnje u stambenim blokovima na procjenu stanja zgrade (poglavlje), Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 207-2016, 2020
- [7] Hadzima-Nyarko, M., Lešić, M., Morić, D.: "Seismic Vulnerability Assessment for Residential Buildings in Osijek, Croatia", Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, Chilean Association of Seismology and Earthquake Engineering Board Directors ACHISINA – Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ur.). Santiago, 2017. str. 1-12

- [8] Bojanić B. & Obad Šćitaroci M. (2021) Urban Morphology of Zagreb in the Second Half of the 19th Century—Landmarks Guiding the Reconstruction of the Town and the Preservation of Identity after the 2020 Earthquake. *Heritage*, 4, 3349–3364. <https://doi.org/10.3390/heritage4040186>
- [9] Crnogorac, M., Todorić, M., Uroš, M., Atalić, J.: Urgentni program potresne obnove – UPPO, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet i Hrvatska komora inženjera građevinarstva. 2020
- [10] Šavor Novak, M., Uroš M, Atalić J., Herak M., Demšić M., Baniček M., Lazarević D., Bijelić N., Crnogorac M. & Todorić M. (2020): Zagreb earthquake of 22 March 2020 – preliminary report on seismologic aspects and damage to buildings. *GRAĐEVINAR*, 72 (10), 843-867.
- [11] HCPI: GIS karta sa podacima o upotrebljivosti zgrada, Hrvatski centar za potresno inženjerstvo, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu i Grad Zagreb, 2020
- [12] Borri, A., De Maria A: Eurocode 8 and Italian code. A comparison about safety levels and classification of interventions on masonry existing buildings. E. Cosenza (ed), Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 237 – 246, 2009 Doppiavoce, Napoli, Italy, 2009
- [13] Da Porto, F., Munari M., Prota A., Modena C.: Analysis and repair of clustered buildings: Case study of a block in the historic city centre of L’Aquila (Central Italy). *Constr Build Mater* 38:1221–1237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.108>, 2013
- [14] CEN: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules and seismic actions (EN 1998-1-1\_draft version\_09-11-2021), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2021
- [15] CEN: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1-2: Rules for new buildings (EN 1998-1-2\_draft version\_03-10-2021), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2021
- [16] CEN: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings and bridges (EN 1998-3\_draft version\_06-05-2021), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2021
- [17] Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine: Tehnički propis o izmjenama i dopunama tehničkog propisa za građevinske konstrukcije (Narodne novine br. 17/17, 75/20, 7/22), 2022
- [18] Oreb, J., Mušterić, B., Šavor Novak, M. Atalić, J.: Influence of pounding on seismic performance of existing buildings in the City of Zagreb, Croatia // Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019) Durability, Monitoring and Repair of Structures / Baričević, A.; Jelčić Rukavina, M.; Damjanović, D.; Guadagnini, M. (ur.), Paris: RILEM Publications S.A.R.L., 2019. 556-563, 2019



- [19] Di Ludovico, M. et al (2020): The reconstruction of residential buildings of historical centres damaged by L'Aquila 2009 earthquake, 17th Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendao, Japan, 2020
- [20] Presidenza del Consiglio dei Ministri, Il Commissario del governo per la ricostruzione nei territori interessanti dal sisma del 24 agosto 2016 (2017): "Misure per il ripristino con miglioramento sismico e la ricostruzione di immobili ad uso abitativo gravemente danneggiati o distrutti dagli eventi sismici verificatisi a far dal 24 agosto 2016, Ordinanza n. 19 del 7 aprile 2017
- [21] Senaldi, I., Guerrini, G., Comini, P., Graziotti, F., Penna, A., Beyer, K., Magenes, G.: Experimental seismic performance of a half-scale stone masonry building aggregate. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(2), 609-643, 2020.
- [22] Tomić, I., Penna, A., DeJong, M., Butenweg, C., Correia, A.A., Candeias, P.X., Senaldi, I., Guerrini, G., Malomo, D., Beyer, K.: "Seismic testing of adjacent interacting masonry structures." 17WCEE, Sendai, Japan, 2020
- [23] Tomić, I., Penna, A., DeJong, M., Butenweg, C., Senaldi, I., Guerrini, G., Malomo, D., Beyer, K.: "Blind predictions of shake table testing of aggregate masonry buildings." 17WCEE, Sendai, Japan, 2020
- [24] Tomić, I., Penna, A., DeJong, M., Butenweg, C., Senaldi, I., Guerrini, G., Malomo, D., Beyer, K.: "Technical report on SERA Transnational Access activities TA1-TA10 M36." Technical report, 2020
- [25] Atalić, J., Krolo J., Damjanović D., Uroš M., Sigmund Z., Šavor Novak M., Hak S., Korlaet L., Koščak J., Duvnjak I., Bartolac M., Serdar M., Dokoza I., Prekupec F., Oreb J., Mušterić B., Demšić M., Baniček M., Žagar T., Jandrić K.: Studija za saniranje posljedica od potresa, Faza I-IX, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2013-2021
- [26] Atalić, J., Lakušić S., Srkoč M., Uroš M., Baniček, M., Žagar, T., Sigmund Z., Šavor Novak M.: Program cjelovite obnove Povijesne jezgre grada Zagreba – Konstruktorski modeli obnove, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatski centar za potresno inženjerstvo, 2021
- [27] Formisano, A., Massimilla, A.: A novel procedure for simplified nonlinear numerical modeling of structural units in masonry aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(7-8), 1162-1170, 2018
- [28] Senaldi, I., Magenes, G., Penna, A.: Numerical investigations on the seismic response of masonry building aggregates. In *Advanced Materials Research* (Vol. 133, pp. 715-720). Trans Tech Publications Ltd, 2010
- [29] Stavroulaki, M.E.: Dynamic behavior of aggregated buildings with different floor systems and their finite element modeling. *Frontiers in Built Environment*, 5, 138., 2019



- [30] Krolo, J., Damjanović, D., Duvnjak, I., Frančić Smrkić, M.: Određivanje mehaničkih svojstava zida (poglavlje), Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 285-307, 2020

# Trajnost umjetnih vlakana u cementnim kompozitima

**Branka Mrduljaš<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Ana Baričević<sup>2</sup>**

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

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

## Sažetak

Trajnost vlakana u cementnoj matrici definirana je njihovom otpornošću alkalnom okolišu. Kako bi utvrdili svojstva trajnosti otpadnih vlakana u cementnim kompozitima vlakna se podvrgavaju različitim ispitivanjima u cilju utvrđivanja njihove kemijske stabilnosti, ali i promjene geometrijskih i mehaničkih svojstava nakon izlaganja alkalnom okolišu. U radu je prikazan sustavan pregled literature iz područja trajnosti staklenih, bazaltnih, ugljičnih vlakana i polimernih vlakana iz recikliranih otpadnih guma. Dan je pregled najčešće korištenih alkalnih otopina, uvjeti i trajanje ispitivanja, definirani su mehanizmi korozije za svaku vrstu vlakana iz dostupne literature. Na osnovi danih istraživanja zaključeno je da postoji nedostatak normiranih ispitivanja u cilju definiranja otpornosti vlakana u alkalnom okolišu, ali i temeljem provedenih ispitivanja predviđanja uporabnog vijeka u cementnim kompozitima.

*Ključne riječi: staklena vlakna, ugljična vlakna, bazaltna vlakna, vlakna iz otpada recikliranih guma*

## Durability of synthetic fibers in cement composites

### Abstract

The durability of fibers in a cement matrix is defined by their resistance to an alkaline environment. To determine the durability properties of waste fibers in cement composites, the fibers are subjected to various tests to determine their chemical stability, as well as changes in geometric and mechanical properties after exposure to an alkaline environment. The paper presents a systematic review of the literature in the field of durability of glass, basalt, carbon and recycled tire polymer fibers. An overview of the most commonly used alkaline solutions, test conditions, and test duration is provided, and corrosion mechanisms for each fiber type are defined from the available literature. Based on the research conducted, it was concluded that there is a lack of standardized tests to define the resistance of fibers in an alkaline environment, but also based on tests to predict the service life of cement composites.

*Key words: glass fibers, carbon fibers, basalt fibers, recycled tire polymer fibers*

## 1 Uvod

Vlakna se u cementnim kompozitima učestalo primjenjuju već duži niz godina. Prva primjena vlakana u cementnim kompozitima upotreba je azbestnih vlakana 1900-tih godina te nakon toga slijedi široka primjena vlakana u cementnim kompozitima [1]. Uloga vlakana je različita, od poboljšanja duktilnost samog kompozita, poboljšanja otpornosti na udar do otpornosti na habanje [1]. Najčešće korištena i analizirana vlakna u cementnim kompozitima su čelična vlakna. Visoko kvalitetna vlakna poput ugljičnih, staklenih ili bazaltnih učestalo se koriste za ojačanje raznih vrsta kompozita. Vlakna iz recikliranih otpadnih guma pronašla su svoju ulogu na tržištu u potrazi za isplativosti i održivosti te se danas sve češće istražuje njihova primjena [2, 3].

Vlakna u cementnim kompozitima izložena su alkalnom okruženju zbog procesa hidratacije cementa. Visoki pH uglavnom je posljedica prisutnosti  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , a pH se može povećati do vrijednosti 13,8 zbog visokih udjela KOH i NaOH [4]. Stupanj korozije osim o okolišnim uvjetima, svakako ovisi o matrici, ali i vrsti vlakana. Stoga je jasno da trajnost kompozita ovisi o velikom broju čimbenika te se ne može jednoznačno odrediti. Ipak, otpornost pojedine vrste vlakana u alkalnom okolišu može se smatrati indikacijom za očekivanu promjenu svojstava kompozita tijekom uporabnog vijeka.

U literaturi pronalazimo različite metode izlaganja vlakana alkalnom okolišu kao što su izlaganje različitim alkalnim otopinama u približnom rasponu pH vrijednosti od 9 do 13,5 ili miješanjem vlakana u cementni kompozit u različitim vremenskim periodima i uvjetima. Koriste se metode tzv. ubranog starenja s povišenim temperaturama [5–7] i manji broj ispitivanja gdje se vlakna izlažu stvarnim uvjetima umiješana u cementnu matricu [8–10]. Međutim, ne postoji uniformirani tj. dogovoreni način određivanja svojstava trajnosti vlakana u alkalnoj otopini (cementnoj matrici). Glavni cilj ovog rada je pregled znanstvene literature na temu ocjene trajnosti umjetnih vlakana u alkalnom okolišu. Istraživanjem su obuhvaćena staklena (GF), bazaltna (BF), ugljična (CF) vlakna i polimerna vlakna iz recikliranih otpadnih guma (RTPF). Rad je podijeljen u 2 poglavlja, u prvom dijelu prikazan je pregled metoda i uvjeta ispitivanja svojstava trajnosti vlakana. U drugom dijelu prezentirana su dosadašnja saznanja o trajnosti odabranih umjetnih vlakana u alkalnom okolišu.

## 2 Metode određivanja svojstava trajnosti vlakana

Mehanizmi degradacije usko su povezani s vrstom promjene mehaničkih i geometrijskih svojstava vlakana tijekom izloženosti alkalnoj otopini. Dugotrajna kemijska otpornost vlakana ne može se direktno odrediti, općenito se uspoređuju vlakna prije i nakon izlaganja ubranom starenju u strogo kontroliranim uvjetima. Trajnost vlakana se ispituje izlaganjem vlakana u različitim otopinama, pri različitim temperatu-

rama i vremenu izloženosti kao što je vidljivo u tablici 1. Najčešće korištene alkalne otopine su NaOH i  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Povišene temperature koriste se prilikom ispitivanja kako bi se ubrzao sam proces degradacije, a vrijeme izlaganja razlikuje se ovisno o autorima i nije egzaktno definirano.

Također, ispitivanja vlakana u različitim alkalnim otopinama suviše su agresivna u usporedbi s izlaganjem vlakana u cementnom kompozitu [11]. Pri tome treba imati na umu da je brzina korozije vlakana ovisna o brojnim parametrima poput temperature, vremena izlaganja, sastava vlakana, sastava otopine te vrsti zaštitnog premaza, tzv. sizinga. Prisutnost zaštitnih premaza na površini vlakna, tipične debljine nekoliko nanometara, najčešće na bazi silana, osigurava dodatnu zaštitu vlakana u alkalnom okolišu [12]. Zaslužan je za poboljšanu adheziju između matrice i vlakana, određuje mehanička svojstva, kemijsku otpornost i toplinsku stabilnost vlakana. Izloženost zaštitnog premaza alkalnom okolišu može se negativno odraziti na njegova svojstva, tj. dolazi do degradacije premaza, ali može doprinijeti inhibiciji korozije vlakana [7]. Ispitivanje kemijske otpornosti mineralnih vlakana (GF i BF) temelji se na analiziranju komponenti vlakana koja se izlužuju u alkalnu otopinu ili nakupljanjem korozivskih produkata na površinu samog vlakna [11, 13–15]. Izluživanjem vlakana u alkalnoj otopini dolazi do stvaranja novih defekata na površini vlakna. U tu svrhu koristi se rendgenska difrakcija (XRD), rendgenska fluorescencija (XRF) i energijska disperzivna spektrofotometrijska (EDX ili EDS) analiza. Rezultat takvih analiza ukazuje da kemijski sastav vlakna u svom središtu ostaje nepromijenjen dok površinski sloj vlakna prolazi različite kemijske promjene [9].

Promjena mase vlakna jedan je od pokazatelja promjene svojstava tijekom izloženosti. Nastaje uslijed stvaranja novih spojeva, izluživanja postojećih spojeva ili zbog degradacije vlakna. Na gubitak mase vlakana značajno utječu temperatura, vrijeme i koncentracija alkalne otopine [16]. Nadalje, smanjenje ili povećanje promjera filameta također ukazuje na kemijsku otpornost vlakana [13], a ujedno je pokazatelj kemijskih promjena [15].

Gubitak čvrstoće usko se povezuje s nedostacima i defektima prilikom proizvodnje vlakana i izluživanjem određenih elemenata iz vlakana u alkalnu otopinu te povećanjem defekata na površini vlakna. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti vlakana također se koriste za mjerenje kemijske otpornosti vlakana [17–19]. Mehanička svojstva vlakana uslijed ubrzanog starenja pokazuju bolje ponašanje u slučaju kada vlakna na sebi imaju zaštitni premaz [20] dok vlačna čvrstoća opada s produljenim izlaganjem u alkalnoj otopini [5].

Promjene na površini vlakana, poput lokalnih oštećenja, pitting korozije, nakupljanja produkata korozije, uočavaju se SEM analizom te ih je moguće povezati s promjenom mehaničkih svojstava vlakana. Analiza topografije površine primjenom mikroskopa atomskih sila (AFM topografija) daje detaljni uvid u stanje površine vlakana prije i nakon izlaganja te otkriva u kojoj mjeri dolazi do degradacije zaštitnog

filma tzv. sizinga [21]. Nove nerazorne metode praćenja korozije vlakana temelje se na metodi analize slike kombinacijom SEM analize i metodama kao što su promjena mase, promjera vlakana i tlačne čvrstoće [22].

**Tablica 1. Pregled ispitivanja trajnosti GF, BF, CF i RTPF vlakana ovisno o vrsti otopine, temperaturi i vremenu izloženosti**

Vrsta otopine	Vrijeme izlaganja	Reference	Temperatura [°C]	Reference
NaOH	do 6 h	[5, 14–16, 19]	23 ± 3	[7, 12, 14, 16–18, 20, 21]
	1 do 30 dana	[7, 12–15, 17, 18, 20–23]	40 ± 3	[7, 13]
	30 do 60 dana	[12, 13, 23]	≈ 50, 60, 70	[7] [14]
	60 do 90 dana	[11, 20, 22]	80	[7, 15]
	90 do 180 dana	[17, 18, 20]	100-105	[5, 19, 23]
Ca(OH) <sub>2</sub>	1 do 30 dana	[17, 18]	23 ± 3	[12, 17, 18, 24]
	30 do 60 dana	[12, 13, 23–25]	40 ± 3	[13]
	60 do 90 dana	[11]	80	[11, 25]
	90 do 180 dana	[17, 18]		
	90 do 180 dana	[24]		
KOH	1 do 30 dana	[13, 25]	40 ± 3	[13]
	60 do 90 dana	[11]	80	[11, 25]
NaOH + KOH	90 do 180 dana	[27]	≈ 50	[27]
NaCl Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaOH + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaOH + NaCl NaOH + NaCl + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 do 30 dana	[12]	23 ± 3	[12]
	30 do 60 dana	[23]	100-105	[23]
NaOH + KOH + Ca(OH) <sub>2</sub>	1 do 30 dana	[13]	23 ± 3	[20]
	60 do 90 dana	[20]	40 ± 3	[13]
Cementna otopina	1 do 30 dana	[7, 15, 17, 18]	23 ± 3	[7, 17, 18]
	60 do 90 dana	[31]	27	[26]
	90 do 180 dana	[26]	40 ± 3, 60	[7]
Cementna matrica	1 do 30 dana	[9]	80	[7, 15]
	90 do 180 dana	[28, 30]	23 ± 3	[9]

### 3 Svojstva vlakana u alkalnom okolišu

#### 3.1 Alkalno otporna staklena vlakna

Staklena vlakna degradiraju u prisustvu vode, kiselina i alkalnih otopina [8]. Degradacija stakla u alkalnim otopinama je spor proces i ubrzava se u slučajima kada je pH iznad 10, što je slučaj u cementnim kompozitima. Korozija staklenih vlakana u cementnim kompozitima nastaje kao rezultat utjecaja porne vode. Alkalije izravno napadaju silicijsku mrežu staklenog vlakna i potpuno otapaju staklo. U slučaju korozije staklenih vlakana u cementnim kompozitima proces ne uključuje samo razgradnju silicijske mreže nego i nakupljanje korozivskih produkata na površini vlakana. Alkalno okruženje dovodi do brzog procesa propadanja koji uključuje gubitak vlačne čvrstoće i mase, te smanjenje promjera filamenata, a razlog tome je prisutnost kalcij hidroksida  $\text{Ca(OH)}_2$  u cementnoj matrici kompozita [10, 16]. Iz tog razloga dolazi do razvoja alkalno otpornih (AR) staklenih vlakana, njihov kemijski sastav dodatno je obogaćen cirkonij dioksidom ( $\text{ZrO}_2$ ). Otpornost staklenih vlakana u alkalnim otopinama raste s povećanjem udjela cirkonijevog dioksida (do 15 %) [23], te se time omogućuje veća alkalna otpornost vlakana u usporedbi s ostalim komercijalnim staklenim vlaknima. Alkalno otporna staklena vlakna otpornija su ali i dalje nisu inertna u alkalnom okolišu [11]. Istraživanja pokazuju da se tijekom alkalne korozije AR staklenih vlakana, na površini razvija sloj bogat  $\text{ZrO}_2$  koji djeluje kao difuzijska barijera i tako smanjuje brzinu korozije [13].

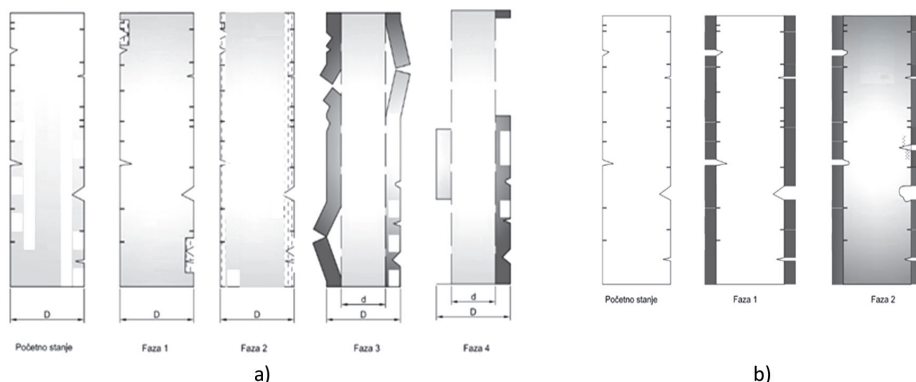
Ispitivanja trajnosti staklenih vlakana u alkalnom okolišu provode se različitim metodama, među kojima su izlaganje zasićenoj otopini  $\text{Ca(OH)}_2$ , cementnoj otopini, NaOH, KOH ili otopinama koje sadrže NaOH, KOH,  $\text{Ca(OH)}_2$  sa ili bez povišenih temperaturama te su izlagani u različitim vremenskim periodima [5, 13, 15]. Mehanizam korozije razlikuje se za različite vrste otopina. U slučaju NaOH i KOH otopine mehanizam korozije manifestira se kao razvoj ljuske na površini vlakana koja se djelomično ili potpuno ljušti sa površine vlakna (slika 1a) dok se u slučaju  $\text{Ca(OH)}_2$  i cementnih otopina (slika 1b) manifestira stvaranjem ljuske i šupljinama/pukotinama na površini vlakana tzv. "pitting" korozijom [7, 13, 21]. Inicijacija korozije počinje izluživanjem natrija i razgradnjom Si-O-Si mreže na površini vlakna i postojećim defektima te tako prodire u dublje slojeve samog vlakna s povećanjem koncentracije cirkonijevog dioksida [24]. Vlakna s premazom u otopini  $\text{Ca(OH)}_2$  prekrivena su precipitatima kalcijevog karbonata i kalcijevog hidroksida i degradirana pitting korozijom, dok vlakna bez premaza sadrže i precipitate silikata bez značajnih promjena [13]. U KOH otopini pH vrijednosti 12.7 nema značajnih promjena dok u otopini s agresivnijim pH 14 vlakna su značajnije degradirana te se na površini formira sloj s povećanim udjelom  $\text{ZrO}_2$  [13].

### 3.2 Bazaltna vlakna

Kao i u slučaju staklenih vlakana, bazaltna vlakna na površini mogu imati zaštitni premaz, tzv. sizing, najčešće na bazi silana [25]. Fizikalno-kemijske analize, nakon izlaganja bazaltnih vlakana alkalnim otopinama, pokazuju da je premaz na bazi silana dobra zaštita te može doprinijeti dugoročnim svojstvima cementnih kompozita ojačanih ovom vrstom vlakana [16]. Ipak, treba imati na umu da uslijed izloženosti agresivnom okolišu, tijekom vremena dolazi do raspadanja zaštitnog premaza [15]. Jedno od prvih istraživanja bazaltnih vlakana 1979 g. [17] upućivalo je na izvrsnu otpornost bazaltnih vlakana u cementnoj otopini. No daljnjim istraživanjima utvrđeno je da mehanizam korozije kod bazaltnih vlakana vrlo sličan koroziji kao kod staklenih vlakana ovisno o vrsti alkalne otopine [14, 19, 26].

Mehanizam korozije bazaltnih vlakana u NaOH otopini prema [15] možemo podijeliti u 4 faze (slika 1a). Faza 1 u kojoj se metalni kationi u sastavu vlakana luče u otopinu procesom izlučivanja, a  $\text{OH}^-$  proizveden u procesu povećava pH vrijednost otopine. Veze Si-O-Si i Al-O-Al prekinute su hidroksilnim skupinama ( $\text{OH}^-$ ). Aluminosilikatna mreža vlakana počinje se otapati u oslabljenim zonama, tj. postojećim površinskim defektima. U fazi 2 nastaje porozan sloj gela na površini vlakana Si-OH strukture, čija debljina se s vremenom povećava. Netopivi metali (npr. Fe, Ca i Mg), oksidi i hidroksidi šire se izvan sloja gela i talože se kao kristalni i amorfni ostatak na površini vlakana, koji može usporiti difuziju  $\text{OH}^-$  u jezgru vlakna i usporiti oštećenje vlakana. U fazi 3 dolazi do potpunog prekrivanja površine vlakna korozijskim slojem. U fazi 4, lokalno se javlja ljuštenje korozijske ljuske. Površina vlakna je neoštećena a preostali promjer je manji od početnog promjera.

U cementnoj otopini prema [7] proces korozije se odvija u dvije faze (Slika 1b). U prvoj fazi proces se odvija sporije u odnosu na NaOH otopinu. Površinski defekti na vlaknima rastu iz razloga što  $\text{OH}^-$  razdvaja Si-O-Si i Al-O-Al strukturu vlakana. Korozija se javlja samo kod površinskih oslabljenja i defekata zbog hidratiziranog kalcijevog hidroksida i silicij dioksida koji tvore teško topiv kalcijev silikat na površini vlakna te štiti vlakno od daljnje degradacije. U ovoj fazi oštećenja tj. pukotine različitih veličina nastale u fazi 1 napreduju u veće pukotine s vremenom te s vremenom dolazi do degradacije vlakna. Izlaganje bazaltnih vlakana u betonu utječe na smanjenje promjera u iznosu od 2 do 5 %, modula elastičnosti od 31 do 37 % i vlačne čvrstoće od 25 do 29 %. Međutim, bazaltna vlakna na bazi alkalnog bazalta ne ostvaruju promjenu u svojstvima što upućuje na usku vezu između otpornosti vlakana i njihovog kemijskog sastava [19].



Slika 1. Shematski prikaz mehanizma korozije za staklena i bazaltna vlakna za a) KOH i NaOH otopini, b)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i NaOH otopini [7]

### 3.3 Ugljična vlakna

Ugljična vlakna primjenjuju se u građevinskoj industriji kao ojačanje nosivih elemenata ili kao zamjena za čeličnu armaturu u polimernim smolama. Pregledom literature nalazi se ograničen broj istraživanja otpornosti ugljičnih vlakana u alkalnom okolišu, ali i podatak da su ugljični filamenti otporni na vremenske uvjete i ne podliježu koroziji u alkalnim uvjetima te ne apsorbiraju vlagu [27]. Prema istraživanju trajnosti osam vrsta vlakana [28] među kojima i ugljičnih vlakana izloženih alkalnim uvjetima u različitom okolišu ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  otopini Portland cementa, KOH i NaOH otopinama) pri povišenim temperaturama (20 – 45°C) pokazalo je da ugljična vlakna imaju najveću kemijsku stabilnost bez gubitka mehaničkih svojstava.

### 3.4 Reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma

Istraživanja recikliranih polimernih vlakana iz otpadnih guma vrlo su rijetka kao i u slučaju ugljičnih vlakana. Ispitivanje alkalne otpornosti RTPF vlakana, izlaganjem 3 mjeseca Lawrencevoj otopini ( $\text{NaOH} + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$ ), pokazalo je nezatno povećanje hrapavosti i točkaste korozije RTPF vlakana [29]. Obzirom na kemijski sastav RTPF vlakana (PET, PA 66, PBT) i prethodna istraživanja otpornosti polimernih vlakana u alkalnom okolišu [30–32], za očekivati je degradaciju RTPF vlakana.

## 4 Zaključak

Trajnost cementnih kompozita ovisi o trajnosti samog kompozita, trajnosti vlakana i interakciji vlakna i cementnog kompozita. Trajnost vlakana u cementnom kompozitu ovisi prije svega o kemijskom sastavu vlakana. Istraživanja pokazuju da:



- Koroziju GF i BF vlakana uzrokuju hidroksilne skupine ( $\text{OH}^-$ ) razlažući Si-O-Si i Al-O-Al strukturu vlakana, ali mehanizam korozije razlikuje se ovisno o vrsti alkalne otopine. U NaOH i KOH otopini razvija se sloj precipitata na površinskom sloju vlakana koji bubri i s vremenom uzrokuje ljuštenje površine. U slučaju  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i cementnih otopina dolazi do nakupljanja precipitata na površini vlakana, ali i nastanka šupljina i pukotina.
- Ugljična vlakna ostvaruju visoku otpornost prema kemijskoj koroziji u alkalnim okolišima.
- RTPF vlakna sastoje se od tri vrste polimera (PET, PA 66, PBT), od kojih PET degradira u prisustvu alkalija.

Nadalje, nedostatak standardiziranih metoda ispitivanja trajnosti vlakana onemogućuje direktnu usporedbu dosad provedenih ispitivanja. Također, ispitivanja ubrzanog starenja vlakana u različitim alkalnim otopinama suviše su agresivna u usporedbi s izlaganjem vlakana u cementnom kompozitu. Tijekom uporabnog vijeka vlakna u cementnoj matrici nisu u potpunosti okružena porem vodom. Potrebno je stoga razviti metodologiju ispitivanja trajnosti vlakana i modele napredovanja korozije, a sve u svrhu predviđanja dugoročnog ponašanja vlakana u cementnim kompozitima.

## Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost u sklopu projekata “Razvoj karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti (DOK-2021-02-4884) i “Cementni kompoziti ojačani otpadnim vlaknima” – ReWire (UIP-2020-02-5242), a koji se provode na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

## Literatura

- [1] A. Bentur and S. Mindess, “Introduction,” *Fibre Reinf. Cem. Compos.*, pp. 21–30, 2020, doi: 10.1201/9781482267747-8.
- [2] A. Baričević, M. Jelčić Rukavina, M. Pezer, and N. Štirmer, “Influence of recycled tire polymer fibers on concrete properties,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 91, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.009.
- [3] B. S. Thomas and R. C. Gupta, “Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber,” *J. Clean. Prod.*, vol. 102, pp. 78–87, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.072.
- [4] Y. Sumra, S. Payam, and I. Zainah, “The pH of Cement-based Materials: A Review,” *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 35, no. 5, pp. 908–924, 2020, doi: 10.1007/s11595-020-2337-y.

- [5] B. Wei, H. Cao, and S. Song, "Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 9, pp. 4244–4250, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.04.009.
- [6] J. Donnini, F. Bompadre, and V. Corinaldesi, "Tensile behavior of a glass FRCM system after different environmental exposures," *Processes*, vol. 8, no. 9, 2020, doi: 10.3390/pr8091074.
- [7] C. Scheffler, T. Förster, E. Mäder, G. Heinrich, S. Hempel, and V. Mechtcherine, "Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 355, no. 52–54, pp. 2588–2595, 2009, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.09.018.
- [8] L. C. Bank, T. R. Gentry, and A. Barkatt, "Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behavior of FRP Composite Structures: Environmental Effects," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 14, no. 6, pp. 559–587, 1995, doi: 10.1177/073168449501400602.
- [9] Y. V. Lipatov, S. I. Gutnikov, M. S. Manylov, E. S. Zhukovskaya, and B. I. Lazoryak, "High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete," *Mater. Des.*, vol. 73, pp. 60–66, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.02.022.
- [10] N. Arabi, L. Molez, and D. Rangeard, "Durability of alkali-resistant glass fibers reinforced cement composite: Microstructural observations of degradation," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 62, no. 3, 2018, doi: 10.3311/PPci.10631.
- [11] B. Holubová, H. Hradecká, M. Netušilová, T. Gavenda, and A. Helebrant, "Corrosion of glass fibres in ultra high performance concrete and normal strength concrete," *Ceram. - Silikaty*, vol. 61, no. 4, pp. 319–326, 2017, doi: 10.13168/cs.2017.0031.
- [12] J. L. Thomason, U. Nagel, L. Yang, and D. Bryce, "A study of the thermal degradation of glass fibre sizings at composite processing temperatures," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 121, no. March, pp. 56–63, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.013.
- [13] A. Helebrant, H. Hradecká, B. Holubová, L. Brázda, M. Netušilová, and Z. Zlámalová-Cílová, "Kinetics of processes modeling corrosion of glass fibers mixed into concrete," *Ceram. - Silikaty*, vol. 61, no. 2, pp. 163–171, 2017, doi: 10.13168/cs.2017.0012.
- [14] V. A. Rybin, A. V. Utkin, and N. I. Baklanova, "Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 53, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.06.002.
- [15] Q. Wang, Y. Ding, and N. Randl, "Investigation on the alkali resistance of basalt fiber and its textile in different alkaline environments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, no. xxxx, p. 121670, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121670.
- [16] M. Afroz, I. Patnaikuni, and S. Venkatesan, "Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 191–203, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.153.

- [17] V. Velpari, B. E. Ramachandran, T. A. Bhaskaran, B. C. Pai, and N. Balasubramanian, "Alkali resistance of fibres in cement," *J. Mater. Sci.*, vol. 15, no. 6, pp. 1579–1584, 1980, doi: 10.1007/BF00752141.
- [18] B. E. Ramachandran, V. Velpari, and N. Balasubramanian, "Chemical durability studies on basalt fibres," *J. Mater. Sci.*, vol. 16, no. 12, pp. 3393–3397, 1981, doi: 10.1007/BF00586301.
- [19] V. Pastsuk et al., "Selection of basalt fiber with resistance to concrete alkaline environment," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 11, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03677-z.
- [20] P. Corvaglia D'appolonia, "Durability of fibers in aggressive alkaline environment," *ICCM Int. Conf. Compos. Mater.*, no. January 2009, 2009, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/289835802>.
- [21] S. L. Gao, E. Mäder, A. Abdkader, and P. Offermann, "Sizings on alkali-resistant glass fibers: Environmental effects on mechanical properties," *Langmuir*, vol. 19, no. 6, pp. 2496–2506, 2003, doi: 10.1021/la020778t.
- [22] M. Ryvolová, L. Svobodová, and T. Bakalova, "Validation of an Image Analysis Method for Evaluating the Chemical Resistance of Glass Fibers to Alkaline Environments," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.3390/ma15010161.
- [23] V. van Zijl, Gideon P.A.G., Slowik, A Framework for Durability Design with Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 240-FDS. 2017.
- [24] J. Orlowsky, M. Raupach, H. Cuyppers, and J. Wastiels, "Durability modelling of glass fibre reinforcement in cementitious environment," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 38, no. 276, pp. 155–162, 2005, doi: 10.1617/14248.
- [25] T. Overkamp, B. Mahltig, and Y. Kyosev, "Strength of basalt fibers influenced by thermal and chemical treatments," *J. Ind. Text.*, vol. 47, no. 5, pp. 815–833, 2018, doi: 10.1177/1528083716674905.
- [26] DI RUOCCO GIACOMO, "Basalt Fibers: the Green Material of the Xxi-Century, for a Sustainable Restoration of Historical Buildings," *Vitr. - Int. J. Archit. Technol. Sustain.*, vol. 2, pp. 25–39, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2016.7022>.
- [27] A. Spelter, S. Bergmann, J. Bielak, and J. Hegger, "Long-term durability of carbon-reinforced concrete: An overview and experimental investigations," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 8, 2019, doi: 10.3390/app9081651.
- [28] F. Micelli and M. A. Aiello, "Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments," *Compos. Part B Eng.*, vol. 159, pp. 490–501, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.005.

- [29] O. Onuaguluchi and N. Banthia, "Durability performance of polymeric scrap tire fibers and its reinforced cement mortar," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 50, no. 2, 2017, doi: 10.1617/s11527-017-1025-7.
- [30] R. Rostami, M. Zarrebini, M. Mandegari, D. Mostofinejad, and S. M. Abtahi, "A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, p. 117998, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.117998.
- [31] R. Rostami, M. Zarrebini, M. Mandegari, K. Sanginabadi, D. Mostofinejad, and S. M. Abtahi, *The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties*, vol. 97. Elsevier Ltd, 2019.
- [32] D. Raghavan, H. Huynh, and C. F. Ferraris, "Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite," *J. Mater. Sci.*, vol. 33, no. 7, pp. 1745–1752, 1998, doi: 10.1023/A:1004372414475.



# Obrada i interpretacija rezultata složenih dinamičkih numeričkih proračuna

**Romano Jevtić Rundek<sup>1</sup>**, izv. prof. dr. sc. **Mario Uroš<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, romano.jevtic.rundek@grad.unizg.hr

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

## Sažetak

Kod analiza oštećenja zgrade uslijed seizmičkog djelovanja traže se sve precizniji, a time složeniji modeli i proračuni. Kod složenijih modela dolazi do problema obrade i interpretacije rezultata. Softverski paketi prilagođeni projektiranju u građevinarstvu koriste štapne i plošne elemente, najčešće u linearnom području (tower, SAP, ETABS), ili s pojednostavljenom plastičnošću (ETABS, SAP, 3muri). U ovom članku prezentirane su Python skripte koje automatiziraju vađenje rezultata iz softverskog paketa Dassault Simulia – Abaqus, pri složenim dinamičkim proračunima, kod modeliranja zidnih elemenata volumnim konačnim elementima uz izrazitu geometrijsku i materijalnu nelinearnost.

*Ključne riječi: Abaqus, građevinarstvo, izvoz rezultata, rezultati, skriptiranje, python*

## Processing and interpretation of complex dynamic numerical analysis

### Abstract

There is rising demand for more precise models and analysis methods, when modelling seismic fragility of buildings. The models that offer most precision often are not adapted for use in civil engineering and offer results that are difficult to interpret. Software packets made for use in civil engineering usually use beam and shell elements, mostly with linear behaviour (tower, SAP, ETABS), or with concentrated plasticity or macroelements (3MURI, ETABS). In this article, Python scripts are presented that allow automated result processing and export from the software “Dassault Simulia – Abaqus” with a model made of 3D finite elements.

*Key words: Abaqus, civil engineering, scripted output, scripts, postprocessing*

## 1 Uvod

U svrhu provjere nosivosti građevine može se primijeniti veliki broj softvera, metoda proračuna i vrsta modela. Svaki će pružiti neke prednosti i neke mane. Između ostalog, jednostavniji modeli će pružiti znatno lakšu interpretaciju rezultata. Softverski paketi prilagođeni projektiranju u građevinarstvu obično koriste materijalnu i geometrijsku linearnost (tower [1], SAP2000 [2], ETABS [3]), neki mogu uzeti u obzir geometrijsku nelinearnost (ETABS [3], SAP2000[2]), a i materijalnu nelinearnost putem koncentrirane plastičnosti (ETABS [3], SAP2000 [2]) ili makrolemenata (3MURI [4]). Prilikom provedbe seizmičke analize u kompleksnijem modelu građevine dolazi do problema interpretacije, ali i izvoza rezultata. Ako promotrimo primjer konkretnog softvera kao što je Abaqus [6], vidi se da postoji mogućnost vađenja svih parametara koji su nam potrebni za interpretaciju, ali je postupak nepraktičan. Potrebno je ručno vaditi i računati prosjeke pomaka u vremenu, očitavati maksimume, te definirati svaku površinu na kojoj nas zanima sila te od iste očitavati maksimume za dimenzioniranje. U slučaju da se želi konstruirati histereza zida, potrebno je podatke izvaditi iz Abaqusa u drugi softver za obradu podataka. Za analizu zgrade, potrebno je izvaditi parametre za jako velik broj zidova, što bez nekakve automatizacije nije praktično. Abaqus je strukturiran vrlo otvoreno za prilagodbe, tako da je moguće Python skriptama provoditi razne zadatke te i navedenu automatizaciju.

## 2 Pregled stanja područja

U praksi se teži proračunima koji su intuitivni, jednostavni i pružaju gotov prikaz i ispis rezultata. To se postiže na dva načina, primjenom jednostavnih linearnih proračuna i primjenom jednostavnih štapnih ili prema potrebi plošnih konačnih elemenata. Linearni elastični proračuni temeljeni na maksimalnim silama pružaju najjednostavnije rezultate za interpretaciju. Štapni elementi pružaju laki prikaz unutarnjih sila za interpretaciju i usporedbu sa normom, dok plošni elementi u većini programskih paketa imaju ugrađenu integraciju naprezanja u presjeku što omogućuje također prikaz sila i usporedbu nosivosti sa normom.

Rjeđe su primjenjivani nelinearni statički proračuni, kao što je metoda postupnog guranja. Rezultati takvih analiza su dosta kvalitetni, relativno lako provedivi u praksi, ali imaju neka ograničenja u primjeni. Relativno je lako interpretirati rezultate te ovisno o softveru postoji i automatsko pisanje izvještaja. Promotrimo li nelinearni proračun metodom postupnog guranja, koji koristi makroelemente, možemo primijetiti da se nelinearno ponašanje zidova modelira koncentriranom plastičnošću. Na osnovu zadanih svojstava materijala za svaki se makroelement automatski konstruira krivulja nosivosti (engl. *backbone curve*). Tijekom analize makroelementi preuizmajuu određene sile, te se na osnovu omjera i veličina tih sila mogu ostvariti

unaprijed definirani oblici otkazivanja, kao što su lom savijanjem, lom smicanjem i lom klizanjem.

Kompleksnije metode, kao što su dinamični proračuni nelinearnih volumnih modela, koji zahtijevaju značajno kompleksniju obradu rezultata i dugo vrijeme proračuna se u inženjerskoj praksi rjeđe koriste. Nepraktičnost pri vađenju potrebnih rezultata iz takvog modela, te obrada istih je jedna od prepreka za primjenu takvih modela. Navedena mana često je rezultat namjene softvera, kao što je slučaj kod softverskog paketa Abaqus, koji je u svojoj osnovi znanstveno-inženjerski softver te nije prilagođen za građevinarstvo. Abaqus ima efikasan solver, podržava definiranje općenitog materijala, geometrije i mreže konačnih elemenata. Moguće je napraviti vrlo detaljan model za nelinearni dinamični proračun te je praktičan za izradu i analizu nepravilnih modela građevine. Takvi modeli su već u primjeni među istraživačima [7, 8], ali se koriste samo za procjenu globalnog ponašanja, lokalne fenomene, propagiranja pukotina, određivanje globalnih progiba i pomaka. Nemogućnost brzog i lakog izvoza podataka je značajno ograničavala primjenu Abaquusa u istraživanjima globalne nosivosti zgrada u području građevinarstva. Potreban je automatski ili poluautomatski izvoz sila i pomaka elemenata, jer se takvi mogu usporediti sa eksperimentima i normama. Omogućavanje takvog izvoza i obrade rezultata je svrha skripti opisanih u ovom članku. Navedene skripte također olakšavaju izradu parametarskih analiza, te se mogu prilagoditi i nadograditi za druge vrste proračuna.

### 3 Korištenje skriptiranih naredbi za obradu rezultata

#### 3.1 Opis skripti

Vađenje podataka iz Abaquusa provodi se kroz 5 skripti. U osnovi, postoje dvije skripte koje se koriste za pripremu modela, dvije skripte za vađenje rezultata u bazu te jedna za vađenje i obrađivanje podataka iz baze. Prve dvije skripte pripremaju model prije provođenja analize, identificiraju pojedine elemente te omogućuju praćenje pomaka i sila označenih presjeka. Naredne dvije skripte vade sile i pomake za prethodno označene zidove i pohranjuju ih kao txt datoteke u bazu rezultata. Zadnja skripta, za obradu podataka, uzima podatke iz prethodno konstruirane baze te ih kombinira, uspoređuje i obrađene podatke daje u nekoliko txt dateoteka, složenih za lagani uvoz u Excel. Ako promotrimo rezultat iz Abaquusa, radi se o polju pomaka i sila u diskretnim čvorovima. Skripte 1 i 2 identificiraju čvorove koji su relevantni za odabrane elemente. Skripte 3 i 4 računaju rezultantu svih sila u čvorovima te prosjek pomaka tih čvorova i maksimalnu devijaciju od prosjeka za kontrolu te navedeno pohranjuju u glavnu bazu podataka. Skripta 5 otvara gotovu bazu te obrađuje podatke, gdje je potrebno traži relativne ili apsolutne pomake, deformacije, traži maksimume sila i pomaka za dimenzioniranje i slično.

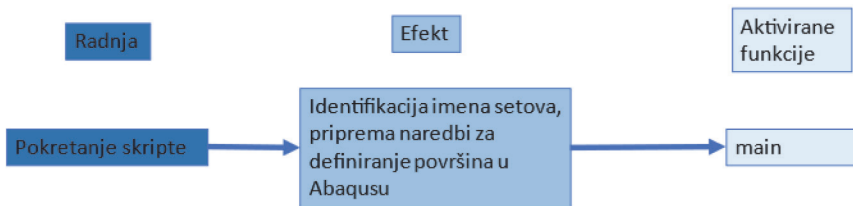


Skripte su generalno formirane tako da se svaka glavna radnja odvija preko jedne glavne funkcije, koja definira globalne varijable te ih mijenja i kombinira pomoću manjih pod-funkcija.

### 3.2 Osnovni koraci za korištenje skripti

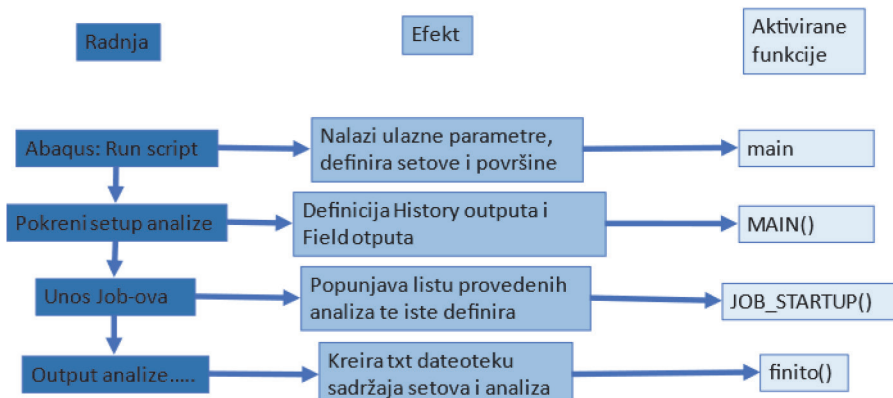
1. Označavanje kritičnih presjeka na konstrukciji
2. Pokretanje skripte 2 (kroz Abaqus sučelje), definiraju se odgovarajući parametri u modelu
3. Pokretanje analiza u Abaqusu
4. Pokretanje skripte 3, odabir imena output baze i kreiranje iste
5. Izvoz rezultata, pojedinačno za svaki model
6. Pokretanje skripte 4. kroz Abaqus sučelje
7. Baza je popunjena/gotova
8. Odabir traženih varijabli u konačnom outputu i pokretanje skripte 5
9. Uvoz ispisanih txt dateoteka u excel, odabrati zarez kao separator
10. Daljnje procesiranje podataka po vlastitom nahođenju

### 4 Prikaz tijeka rada skripti



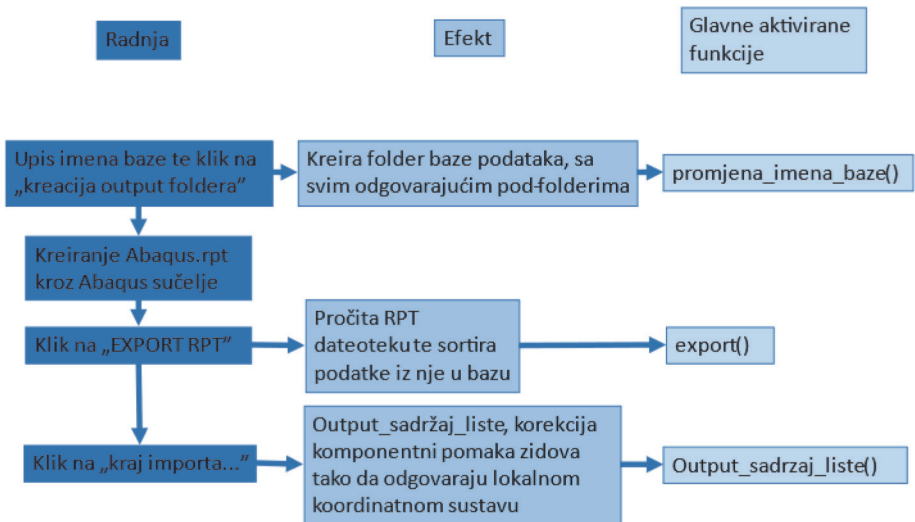
Slika 1. Dijagram rada skripte 1

Zadatak skripte 1 je pročitati abaqus replay kod, generiran tijekom označavanja presjeka, te iz njega izvući imena presjeka. Kada su definirana imena presjeka zapisuje i naredbe koje će skripta 2 koristiti za definiranje površina na mjestima označenih presjeka, te su površine potrebne za izvoz sila tih presjeka.



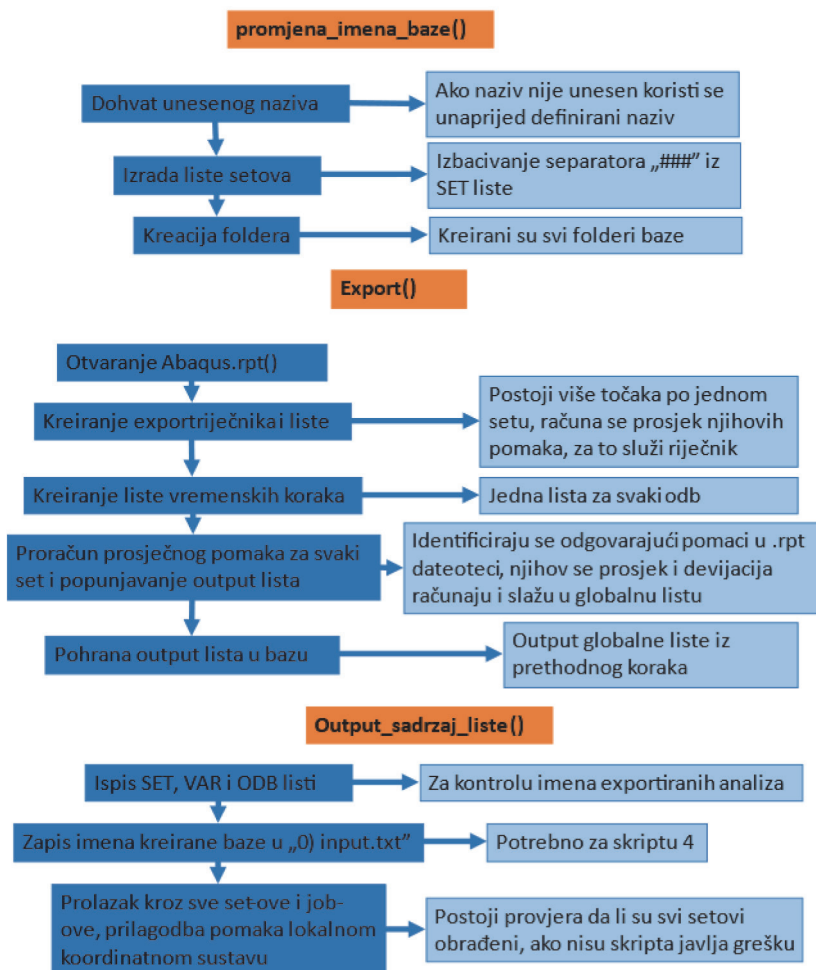
Slika 2. Dijagram rada skripte 2

Skripta 2 definira sve parametre unutar Abaqusa potrebne za daljnji izvoz rezultata. To uključuje ponovno definiranje setova, definiranje površina na presjecima, definiranje field i history outputa za sve setove.



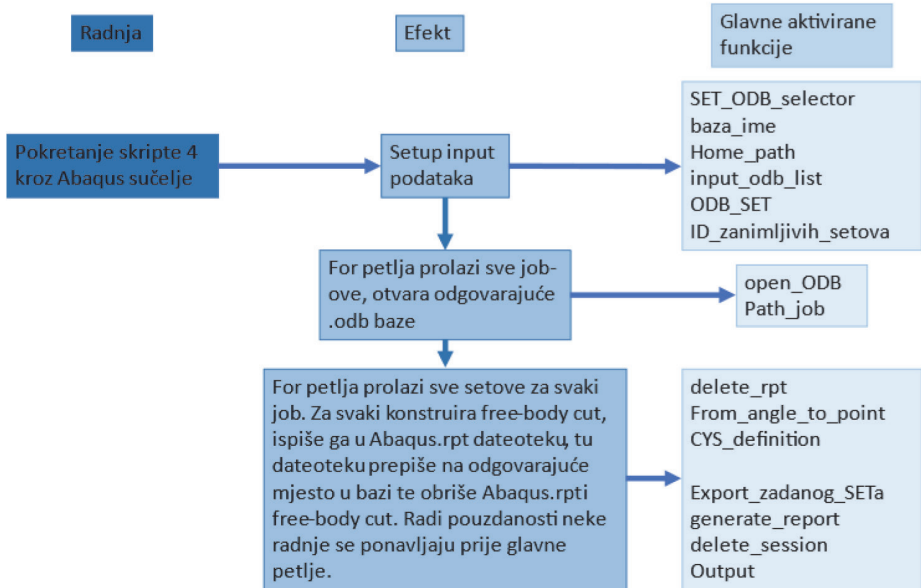
Slika 3. Dijagram rada skripte 3

Skripta 3 se koristi za definiranje baze podataka i popunjavanje iste pomacima iz modela. Također se kreira lista vremenskih koraka za svaku analizu, jer ista zna varirati između različitih analiza.

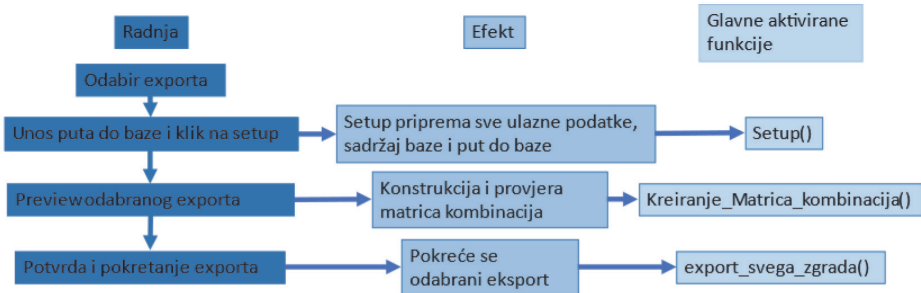


Slika 4. Opis glavnih funkcija skripte 3

Skripta 4 kreira presjeke na kojima integrira sile čvorova konačnih elemenata. Silu rastavi na komponente po odgovarajućem lokalnom koordinatnom sustavu, te ju zapisuje u bazu definiranu skriptom 3. Skripta 4 sama otvara Abaqus baze podataka tako da nije obavezno imati rezultate otvorene prilikom pokretanja.

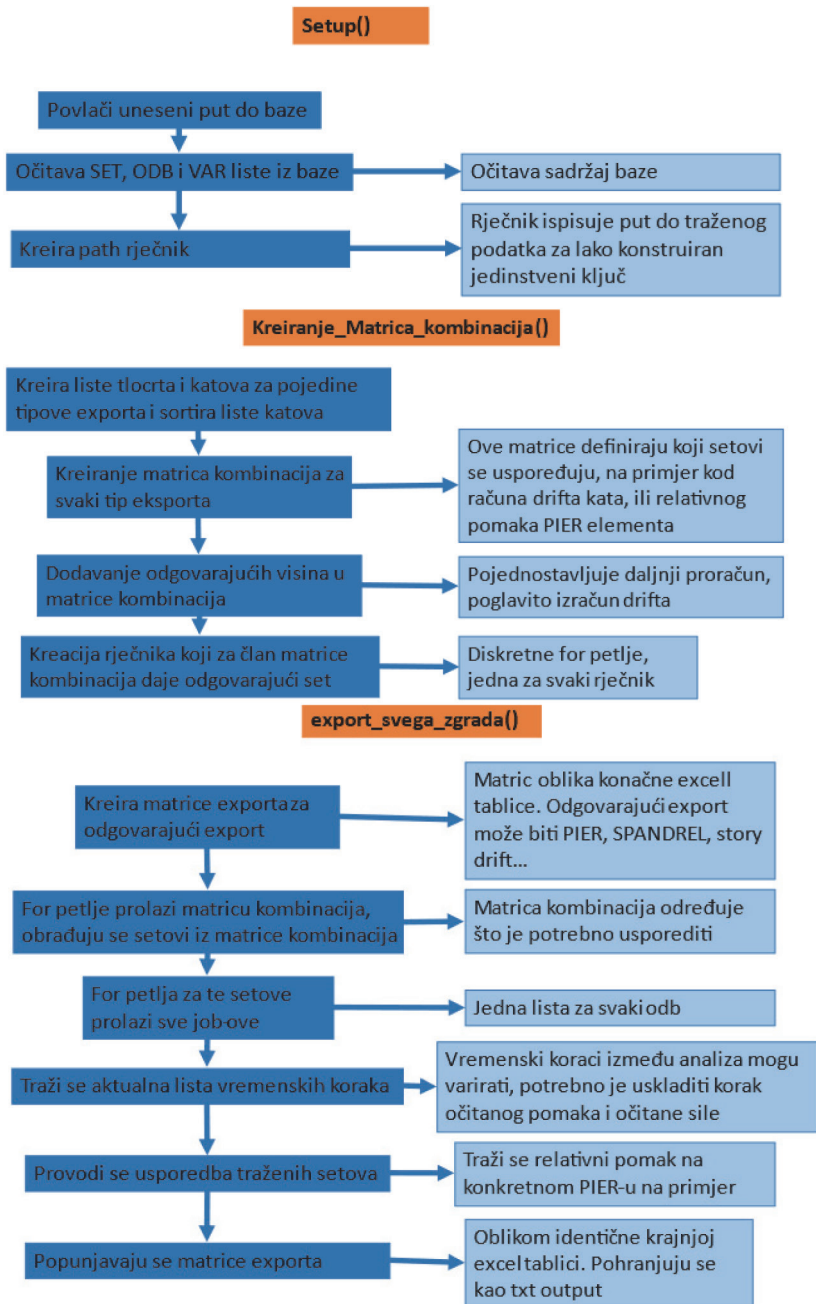


Slika 5. Dijagram rada skripte 4



Slika 6. Dijagram rada skripte 5

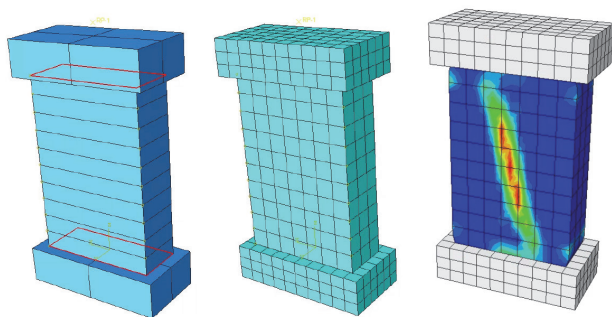
Skripta 5 obrađuje sirove podatke iz baze i oblikuje ih u rezultate koje je lako interpretirati. Najduža je i najkompleksnija, izgrađena je modularno radi lakših modifikacija.



Slika 7. Opis glavnih funkcija skripte 5

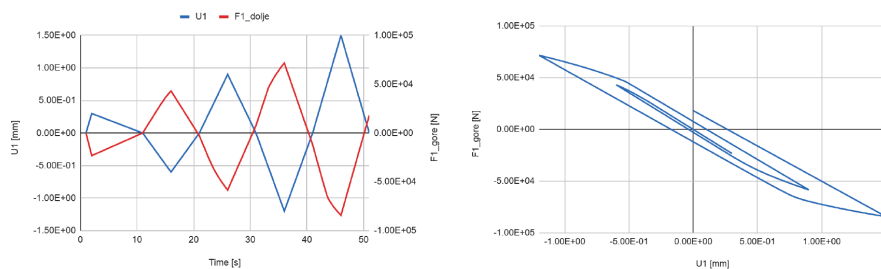
## 5 Numerički primjer

Na slici 8 prikazan je model kalibriran sukladno eksperimentu opisanom u članku [9]. Zid je dimenzija  $1 \times 0,4 \times 1,5$  [m], izrađen od opeke. Na slici 8 mogu se vidjeti promatrani presjeci (crveno, lijevo), mreža konačnih elemenata (sredina) te prikaz plastičnih deformacija na zidu nakon provedene analize. Setovi su kombinirani tako da se promatraju krajnje vanjske površine kao jedan PIER element. Promatraju se sila i pomak u ravnini, za proizvoljno opterećenje, radi demonstracije izvoza rezultata ovakvog kompleksnijeg modela.

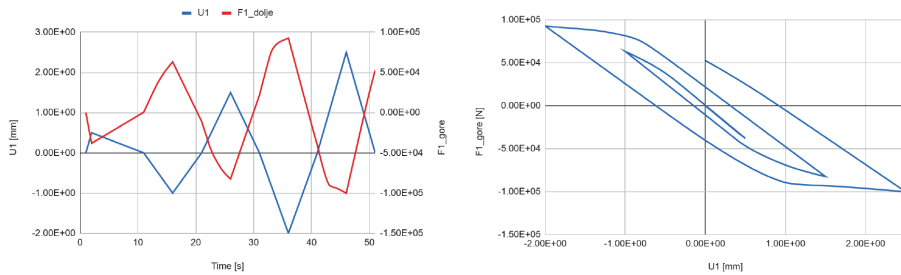


Slika 8. Zid obrađen za primjer. Označeni setovi/mesh/rezultati

Na grafovima (slika 9 i slika 10) su prikazane poprečna sila i pomak u ravnini, za dva slučaja opterećenja prisilnim pomakom baze. Naneseni pomak i ostvarena sila tijekom analize mogu se vidjeti na lijevom grafu (slika 9 i slika 10), a oblik histereze zida na desnom (slika 9 i slika 10). Prikazani su rezultati dobiveni importiranjem rezultata pomoću opisanih skripti u excel, bez daljnje obrade. Klasično Abaqus sučelje omogućava ovakav prikaz histereze zida, ali takav ručni postupak zahtjeva puno vremena. Pri analizi konkretne građevine sama brojnost zidova znači da bi takav postupak vađenja i obrade podataka bio neracionalna upotreba vremena. Automatizacija navedenih koraka omogućava sistematizirani izvoz podataka iz Abaqusa, sa histerezama konkretnih elemenata te maksimalnim i minimalnim vrijednostima sila i pomaka za dimenzioniranje ili provjeru faktora sigurnosti.



Slika 9. Rezultati u vremenu (lijevo) i kao histereza (desno), za maksimalni pomak od 1,5 mm



Slika 10. Rezultati u vremenu (lijevo) i kao histereza (desno), za maksimalni pomak od 2,5 mm

## 6 Zaključak

Opisane skripte su u trenutnom obliku u stanju izvaditi rezultate za veći model, sa više različitih zidova i katova, zidovima pod raznim kutevima te za više različitih složenih dinamičkih proračuna i sve navedeno složiti u jednu excell tablicu za daljnju analizu. Da se takav izvoz podataka pokuša ručno izvesti, ovisno o veličini modela, to bi moglo trajati danima, ako ne i tjednima. Ručno vađenje takvih podataka bi također povećalo vjerojatnost pogreške. Skriptiranjem izvoza i obrade podataka značajno proširujemo primjenu Abaqus softvera u građevinarstvu, a opisane skripte imaju dosta potencijala i za daljnji razvoj. Izvozom sila i pomaka označenih presjeka, skripte omogućavaju provjeru oblika histereza pojedinih zidova, prikaza maksimalnih sila u presjeku, prikaza međusobne ovisnosti bilo kojih izvedenih veličina, kao na primjer ovisnost poprečne sile i momenta u ravnini zida. Mogućnost ispisa histereze također olakšava kalibraciju zakona ponašanja materijala izloženog cikličkom opterećenju. Ispis maksimalnih vrijednosti sila i pomaka omogućava brzu provjeru nosivosti po normi. Također ako se radi o ispisu većeg broja analiza, moguće je promatranje utjecaja nekih ulaznih parametara na konstrukciju, kao što su modul elastičnosti, prigušenje, opterećenje itd. Obzirom da skripte prate pomake konkretnih čvorova, neovisno o ostalim parametrima modela, moguće je koristiti proizvoljan zakon ponašanja, proizvoljna opterećenja te složenu geometriju. Potrebno je spomenuti i ograničenja trenutnih skripti, šablonski su primjenjive na uobičajene zidove i nadvoje. Ako se radi o drugačijim elementima za dimenzioniranje potrebno je primijeniti nešto kreativnosti. Primjer elementa na koji je skripta lako primjenjiva je zid u zgradi, kojemu vlastita težina ne doprinosi značajno ukupnoj uzdužnoj sili te koji ima klasične rubne uvjete, odnosno kontakt sa konstrukcijom na vrhu i na dnu. Primjer gdje je upotreba ograničena bi bio nosivi fasadni zid bez otvora, koji se proteže od dna do vrha građevine i na koji se nastavlja zid sa otvorima. Takav zid nema jednostavne rubne uvjete i analiza nije šablonska po trenutnim skriptama. No moguće je definirati nekoliko presjeka po visini takvog zida i dobiti dijagrame njegovih unutarnjih sila i deformacija te na osnovu njih provjeriti nosivost zida. Za

kraj treba spomenuti da s riješenim definiranjem presjeka i vađenjem sila iz istih, postojeće skripte se mogu prilagoditi za drugačiji output. Na prethodnom primjeru fasadnog zida, bilo bi potrebno dodati kod u skripti 5 koji bi odgovarajuće presjeke složio tako da nacрта dijagrame unutarnjih sila te u skripti 2 dodati novi tip presjeka za crtanje tih dijagrama. Ostatak koda može ostati nepromijenjen.

## Zahvala

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP – 2020-02-1128.

## Literatura

- [1] RADIMPEX – Tower, <https://www.radimpex.rs/en/tower>
- [2] SAPFIRE SAP2000, <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
- [3] SAPFIRE ETABS, <https://www.csiamerica.com/products/etabs>
- [4] STA DANA 3MURI, <https://www.3muri.com/s-t-a-data/>
- [5] Python, <https://www.python.org/>
- [6] Dassault Simulia – Abaqus, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [7] Roudane, B., Adanur, S., & Altunışık, A. C.: Numerical modeling of masonry infilled reinforced concrete building during construction stages using Abaqus software. *Buildings* 9(8), 2019, 181.
- [8] Raza, A., & Ahmad, A.: Numerical investigation of load-carrying capacity of GFRP-reinforced rectangular concrete members using CDP model in ABAQUS. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [9] Kržan, M., Gostič, S., Cattari, S., & Bosiljkov, V. (2015). Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis of historical buildings. *Bulletin of earthquake engineering*, 13(1), 203-236.





# Pregled metoda za određivanje utjecaja vibracija od prometovanja tramvajskih vozila na okolne građevine

Krešimir Burnać<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Ivo Haladin<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

Zbog blizine tramvajskog kolosijeka, vibracije koje nastaju prilikom prolaska tramvajskog vozila izazivaju nelagodu osobama koje rade i borave u okolnim građevinama, a mogu imati štetan utjecaj i na same građevine. Mreža tramvajskih kolosijeka u gradu Zagrebu svojim velikim dijelom prolazi kroz uži centar grada gdje su na nekim mjestima udaljenosti kolosijeka od obližnjih građevina manje od 7 metara. Nakon potresa 2020. ova problematika još je od većeg značaja te se ona obrađuje u ovom radu. U radu su opisana i prethodna istraživanja koja sadrže više različitih metoda mjerenja (na kolosijeku, tramvajskom vozilu i zgradama) kao temelj za detaljnija istraživanja. Svrha mjerenja je uspostava modela koji bi definirao parametre (koji utječu na razine vibracija) vezane za različita tramvajska vozila i kolosijek, predviđao kretanje razina vibracija u vremenu i njihovo širenje kroz okolno tlo te na koji način takve vibracije utječu na okolne građevine. Takav model bio bi direktni indikator i uputa upravitelju tramvajске infrastrukture kako optimizirati potrebne radove na održavanju i na taj način dodatno smanjiti troškove održavanja mreže.

*Ključne riječi: vibracije, tramvajski promet, građevine, optimizacija, održavanje*

## An overview of methods for determining the impact of vibrations from tramway vehicles on nearby buildings

### Abstract

Vibrations from tramway operations can potentially cause discomfort for the building residents and occupants and can be dangerous for buildings themselves because of their proximity to the tramway track. Big part of the Zagreb tramway traffic network is located within the historic city centre, at some locations distanced less than 7 meters away from the buildings. Since earthquake in 2020 this issue is even more relevant, and it is processed in detail in this paper. There is also an emphasis on previous research containing a few different measurements (on the tramway track, tramway vehicle and buildings) as a foundation for more detailed research in the future. The purpose of the vibration measurements is to build a model that would define parameters that are connected to different tramway vehicles and tram track. Also, it could predict the change of vibration levels in time, their propagation through the soil as well as the impact of vibrations on the surrounding buildings. That kind of model would serve as a direct indicator and an input to the tramway network operator on how to optimise the needed interventions on the track and in that way additionally lower maintenance costs and increase living standard in the cities.

*Key words: vibrations, tramway traffic, buildings, optimization, maintenance*

## 1 Uvod

Za definiciju širenja vibracija od izvora do pojedinih građevina potrebno je razumijevanje više parametara o kojima ovise nastanak i propagacija vibracija. Interakcija kotača željezničkog vozila s tračnicom predstavlja izvor vibracija, tlo je definirano kao medij kroz koji se šire vibracije dok zadnji parametar predstavljaju građevine na koje se vibracije prenose. U uvodnom dijelu ovog rada predstavljeni su primjeri iz literature vezani uz analizu vibracija od željezničkog vozila. Drugo poglavlje opisuje prethodna istraživanja na ovu temu provedena na Zavodu za prometnice Građevinskog fakulteta te je predstavljena ideja budućih istraživanja vezana uz pojavu vibracija od tračničkog prometa. U zaključku se nalazi kratki osvrt na temu i smjer daljnjeg istraživanja.

### 1.1 Interakcija vozila i kolosijeka kao izvor vibracija

Neupitno je da je kretanje željezničkih vozila po kolosijeku uzrok nastanku vibracija i njihovom širenju u okoliš. Glavni izvor vibracija na željezničkoj pruzi dolazi od kontakta kotača i glave tračnice pri prolasku željezničkog vozila [1]. Vibracije koje se javljaju pri prometovanju željezničkih vozila neželjena su pojava koja utječe na samo vozilo, tračničku infrastrukturu, okolne objekte, a osobito na putnike u vozilu. Mjerenje i analiza vibracija pri prometovanju tračničkih vozila općenito je vrlo bitna jer se iz nje može razlučiti mnogo podataka o stanju samih vozila i tračničke infrastrukture, upozoriti nas na nepravilnosti ili puknuće tračnice i kolosijeka općenito, te nam ukazati na neudobnost vožnje na pojedinim dionicama kolosijeka. Postoje brojne metode koje se koriste za mjerenje vibracija kod tračničkih vozila koja prometuju na klasičnom željezničkom kolosijeku. Takvi kolosijeci većih su osovinskih opterećenja, brzine prometovanja njima su veće i protežu se većim udaljenostima nego što je veličina prosječne tramvajске mreže. Za razliku od klasičnih kolosiječnih konstrukcija, na gradskim kolosijecima prevladavaju se manje udaljenosti, manje su brzine vožnje, drugačije pružanje trase koja često prati mrežu gradskih cesta te može biti velike zakrivljenosti, intenzivniji je promet, izvedba skretnica i križališta koja su generatori najvećih vibracija je drugačija (izvedba u plitkom žlijebu), drugačiji su motivi i očekivanja putnika te uvjeti pri putovanju. Zbog toga je prometovanje tramvajskog, lakog željezničkog vozila, specifično za analizu vibracija i različito od analize vibracija na klasičnom kolosijeku [2].

Detekcija nepravilnosti na kolosijeku u ranoj fazi i pravovremeno održavanje mogu minimalizirati dugoročne troškove željezničke infrastrukture. Monitoring i procjena stanja kolosijeka su proučavani dugi niz godina i iz mnogih istraživanja razvila su se četiri različita pristupa; monitoring baziran i vezan uz infrastrukturu, monitoring infrastrukture baziran na kretanju instrumentiranog vozila, monitoring vozila na bazi kretanja instrumentiranog vozila i monitoring vozila baziran na mjernim postajama

na infrastrukturi. Posebna mjerna vozila koriste se u željezničkim upravama za procjenu stanja kolosijeka, a razvoj jednostavnijih mjernih sustava omogućio je da takvi sustavi budu instalirani i u standardna vozila namijenjena prijevozu putnika. Razvoj moderne elektronike i robusnih senzora (koji mogu biti instalirani ispod standardnih vozila namijenjenim prijevozu putnika) omogućio je monitoring infrastrukture baziran na kretanju vozila. Takav sustav predstavlja učinkovit i relativno jeftin monitoring na dnevnoj bazi sa kontinuiranim ažuriranjima prikupljenih podataka [3].

## 1.2 Vibracije na zgradama

Mnogi parametri mogu imati utjecaj na vibracije koje se šire prema od kolosijeka obližnjim zgradama [4] od kojih je najvažniji udaljenost zgrade od kolosijeka. Udaljavajući se od izvora, vibracije se smanjuju zbog njihove propagacije kroz tlo i gubitka energije na putu od izvora prema prijatelju [1]. U urbanim sredinama vibracije se prenose kroz tlo do okolnih građevina koje su često u neposrednoj blizini kolosijeka i kao takve mogu imati značajan utjecaj na ljude koji žive ili rade u blizini i na same građevine. Najveći rizik od oštećenja postoji za građevine koje su manje od 7 metara udaljene od osi kolosijeka, dok na one koje su udaljene više od 25 metara, vibracije imaju zanemariv utjecaj [5]. Promatrajući vertikalno širenje vibracija unutar građevine, najmanje vibracije očekuju se u podrumu (u temeljima), dok se one najveće pojavljuju na višim katovima građevina [1]. Budući da je odziv građevine (zgrade) podložan pod utjecajem njezinih dinamičkih, strukturalnih i materijalnih karakteristika, jako je izazovno ocijeniti utjecaj koji vibracije imaju na zgrade i njihove stanare [4].

Potrebne su vrlo zahtjevne kalkulacije koje koriste jedinstvene i točne granice za promatranja gibanja tla kako bi se predvidjela oštećenost zgrade, jer na odziv zgrade utječu dinamičke karakteristike te svojstva materijala strukturalna svojstva, dok je konačno otkazivanje često rezultat nekoliko događaja. Za procjenu utjecaja vibracija na dijelove zgrade koriste se dva različita pristupa. Prvi pristup podrazumijeva korištenje metoda koje koriste baze podataka o svojstvima zgrada za izradu modela baziranog na tim podacima, dok se drugi pristup bazira na metodama koje se oslanjaju na direktna mjerenja vibracija na zgradama (npr. mjerenje vibracija uzrokovanih prometom) [6]. Najčešće se koristi vršna brzina vibracija (engl. Peak Particle Velocity - PPV) za opis vibracija jer je PPV relativno neovisan o frekvenciji u usporedbi sa vršnim pomakom ili vršnom akceleracijom [7]. Postoje razne norme i studije koje definiraju različite granice razina vibracijskih brzina koje utječu na ljude i građevine [1]. Prema normi HRN DIN 4150-3: 2016 Vibracije u zgradama - 3.dio: Djelovanje na konstrukcije, građevine su podijeljene na standardne građevine, armirano - betonske građevine i osjetljive građevine (spomenici i druge povijesne građevine, bolnice, stare obiteljske kuće, spremnici za vodu, zidani dimnjaci, itd.) [8]. Navedena norma korištena je u konkretnim primjerima mjerenja vibracija na odabranim lokacijama (starim, zidanim, povijesnim zgradama) u gradu Zagrebu.

### 1.3 Širenje vibracija kroz tlo

Vibracije i buka koje se prenose tлом tema su mnogih istraživanja kako bi se procijenio utjecaj novih željezničkih trasa ili rekonstrukcija postojećih na okoliš i ljude koji žive i rade u blizini željezničke pruge. Istraživači i stručnjaci pristupaju ovoj temi koristeći širok raspon modela predviđanja sa različitim stupnjevima kompleksnosti i preciznosti. Takve modele teško je usporediti i uniformirati jer u velikoj mjeri ovise o veličini baze podataka i iskustvu stručnjaka za vibracije koji izrađuju te modele. U sklopu projekta "SILVARSTAR" [9] stvara se baza podataka vezana uz emisiju vibracija koje nastaju prolaskom željezničkog vozila, njihovo širenje i izradu prijenosnih funkcija. Cilj projekta je razvijanje "user-friendly" alata za predviđanje, koji bi se koristio za izradu projekata vezanih uz utjecaj vibracija koje se šire kroz tlo. Alat je baziran na hibridnom pristupu u frekvencijskoj domeni koji kombinira prednosti numeričkih metoda i eksperimentalnog pristupa. Razina vibracija na zgradama izražava se kao rezultat uvjeta izvora vibracija (željezničko vozilo), širenja (tlo) i svojstva recipijenta (zgrade), gdje je svaki uvjet frekvencijski ovisan i može biti prikazan pomoću numeričkih modela ili eksperimentalnih podataka. Kako bi se osiguralo da će ovakav alat biti sposoban raditi kalkulacije velikog opsega i biti dostupan velikom broju korisnika, biti će izrađen na temelju opširne baze podataka koja uključuje kako izmjerene tako i unaprijed izračunate podatke. Parametri koji opisuju željeznička vozila su izabrani da odgovaraju različitim generičkim tipovima vozila (međugradski vlakovi, metro, tramvajska vozila, teretni vlakovi). Slično su definirani i parametri koji opisuju kolosijeke koji su vezani uz glavne željezničke kolosijeka i kolosijeke u urbanim sredinama (tramvaj, metro) za klasičnu kolosiječnu konstrukciju (sa zastornom prizmom) i kolosijeke na čvrstoj (betonskoj) podlozi. Numerički podaci su dostupni u obliku unaprijed izračunatih vrijednosti na temelju različitih funkcija otpora tla i prijenosnih funkcija u tlu. Kao dodatak numeričkim podacima, postoje i slični empirijski podaci koji sadrže gustoće sile, mogućnost širenja sile linijskog izvora i spektar vibracija na različitim udaljenostima od kolosijeka, temeljeni na dobro dokumentiranim "case study" istraživanjima. Recipijent (zgrada) je opisan pomoću niza korekcijskih faktora koji su različiti za pojedine strukture (zgrade). Ti faktori opisuju prijenos vibracija iz okoline na temelje zgrade, sa temelja na različite katove i širenje zvuka (od vibriranja katova) u prostorije zgrade [9].

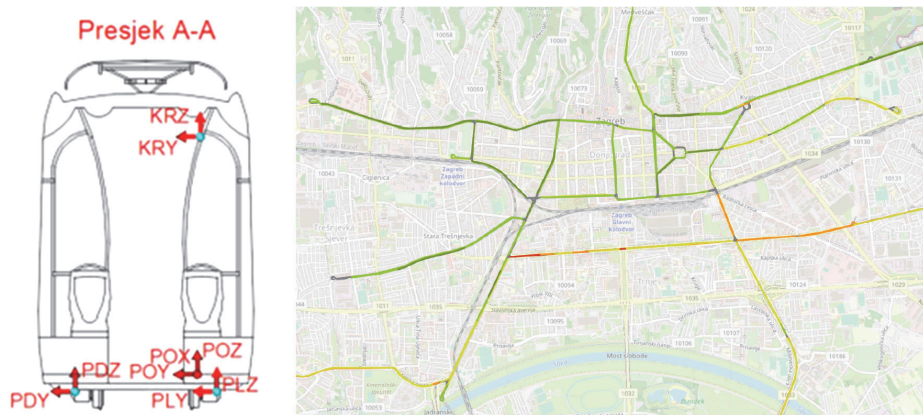
## 2 Prethodna istraživanja

Prethodna istraživanja vezana uz ovu temu provođena su od strane zaposlenika Katedre za željeznice, na Zavodu za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u posljednjih nekoliko godina. Naglasak istraživanja je vezan uz mjerenje vibracija koje nastaju prilikom prometovanja tramvajskog vozila po kolosijeku, pro-

učavanje utjecaja nepravilnosti ili oštećenja kolosijeka na vozilo (i na ljude u vozilu) te utjecaja vibracija koje se šire prema okolnim zgradama na same zgrade i ljude koji borave u njima. Cilj budućeg istraživanja je što točnije definirati parametre vezane uz izvor vibracija (vozilo, kolosijek), medij kroz koji se šire vibracije (tlo) i vrstu recipijenta (zgrada) kako bi se pomoću njih napravio model koji može predviđati nastanak povišenih razina vibracija, predvidjeti i ubrzati njihovu detekciju te optimizirati intervenciju na kolosijeku s ciljem smanjivanja tih vibracija.

## 2.1 Mjerenje razina vibracija u tramvajskom vozilu na tramvajskoj mreži u Zagrebu

Vibracije koje se javljaju pri prometovanju željezničkih vozila neželjena su pojava i mogu imati negativan utjecaj na samo vozilo, tračničku infrastrukturu, okolne objekte i na putnike koji se nalaze u vozilu. U sklopu Studije razvoja tramvajskog prometa Grada Zagreba [10] izvršeno je mjerenje indeksa udobnosti vožnje i mirnoće hoda tramvajskog vozila. Pomoću mjerenja i analize vibracija koje se javljaju pri prometovanju tračničkih vozila moguće je prikupiti velik broj podataka o stanju tračničke infrastrukture i vozila. Prikupljeni podaci mogu se koristiti za ocjenu mirnoće hoda, otkrivanje nedostataka na kolosijeku, vozilima i kontaktnoj mreži te ocjenu razine udobnosti u vozilu [11].



Slika 1. Prikaz pozicija akcelerometara na vozilu i izračunatih razina udobnosti vožnje na zagrebačkoj tramvajskoj mreži

U istraživanju koje se provodilo u sklopu ispitivanja na tramvajskoj mreži u Osijeku (2016.) i u Zagrebu (2018.) analizirana je mirnoća hoda tramvajskog vozila i udobnost vožnje. Udobnost vožnje i kvaliteta vožnje tema su brojnih istraživanja u različitim željezničkim upravama [12, 13, 14]. To je kompleksno područje koje uzima u obzir interakciju kolosijeka i vozila, odziva vozila i reakcije ljudi na razine vibracija koje nastaju prilikom prometovanja željezničkog vozila po kolosijeku. Za ocjenu metoda

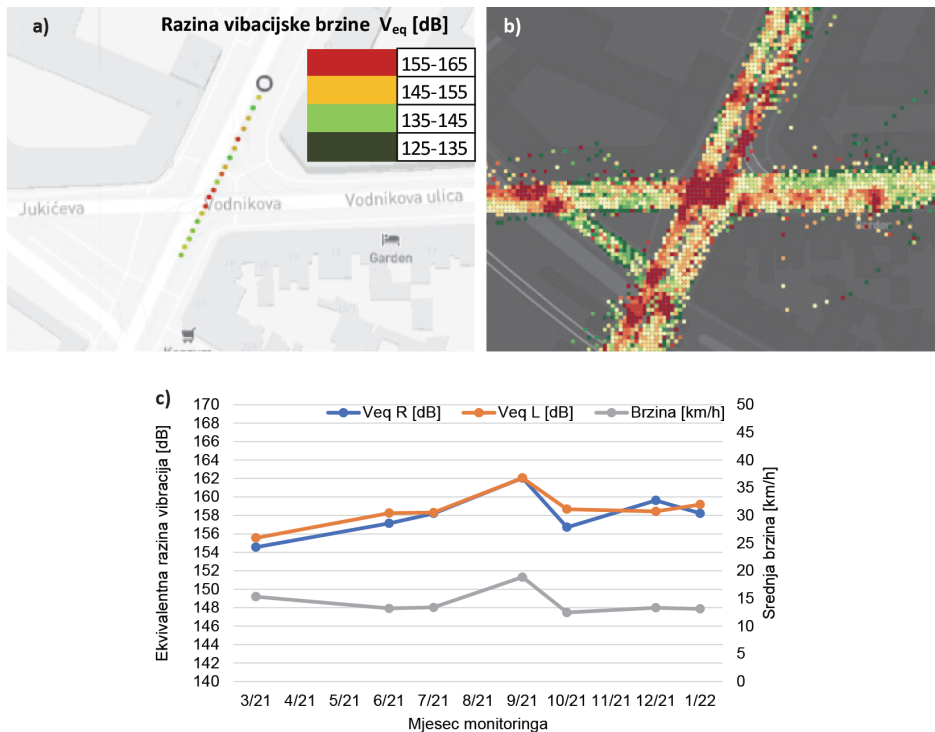
za određivanje mirnoće hoda i udobnosti vožnje korišteni su parametri na osnovi vibracija okretnog postolja i sanduka vozila pomoću konvencionalnog tramvajskog vozila koje je opremljeno odgovarajućom mjernom opremom (Slika 1). Za procjenu udobnosti vožnje duž tramvajske mreže u Zagrebu korištene su tri različite metode: Ekvivalentna razina vibracija (Laeq), Sperlingov indeks vožnje  $W_z$  [15] i metoda prema normi EN 12299 [16] (bazirana na normi ISO 2631 [17]). Mjerenja su obuhvatila cijelu tramvajsku mrežu Zagreba (ukupno 116km pruge) sa različitim konfiguracijama kolosijeka na pojedinim dijelovima mreže. Metoda Sperlingovog indeksa vožnje i metoda kontinuirane udobnosti mogu se na temelju ovakvog pristupa koristiti za ocjenjivanje sveukupne razine udobnosti na poddionicama tramvajske mreže [11]. Buduća istraživanja podrazumijevaju detekciju zavora i naboranosti pomoću frekventne analize prikupljenih podataka razina vibracija prilikom prolaska tramvajskog vozila po tramvajskoj mreži. Ovakav pristup omogućio bi automatizaciju mjerenja naboranosti i nepravilnosti (vozilo prometuje tramvajskom mrežom prema redovnom rasporedu vožnje i konstantno prikuplja podatke o razinama vibracija) te smanjenje troškova održavanja i smanjenje razina vibracija i buke.

## **2.2 Monitoring razina vibracija na tramvajskom kolosijeku uz pomoć instrumentiranog tramvajskog vozila**

U svrhu ocjene stanja kolosijeka te utjecaja vibracija od prometovanja tramvajskih vozila na građevine stradale u potresu M5.5 2020. u Zagrebu, proveden je monitoring razina vibracija nastalih prolaskom tramvajskog vozila po kolosijeku. Razine vibracija mjerene su na cjelokupnoj mreži ZET-a u razdoblju od 10 mjeseci. Na niskopodni tramvaj tipa TMK 2200 instaliran je uređaj za monitoring vibracija koji se sastoji od tri jedinice. Akcelerometri se nalaze na postolju kotača, jedinica zadužena za geolociranje i komunikaciju sa serverom nalazi se na krovu dok se napajanje vrši pomoću jedinice unutar vozila. Svi izmjereni podaci prikupljaju se na udaljeni server putem GSM mreže, te prikazuju u specijaliziranom softveru za prikaz i analizu podataka.

Prilikom mjerenja prikupljani su podaci o vibracijskim brzinama, akceleracijama, GPS poziciji te o brzini prometovanja vozila. Brzina uzorkovanja akcelerometara bila je 500 Hz, dok su razine vibracijskih brzina i akceleracija računane na bazi 1s. Na temelju prikupljenih podataka, moguće je prikazati podatke o razinama vibracijskih brzina za svaku lokaciju koja je snimljena pomoću mjernog tramvaja (Slika 2a). Iz slika 2a i 2b je vidljivo da se najveće razine vibracijskih brzina javljaju prilikom prolaska tramvaja preko križališta (označeno crvenom bojom, 155 - 165 dB). Pomoću drugog modula softvera (Slika 2b), postoji mogućnost usporedbe razine vibracijskih brzina u vremenu za izabranu lokaciju. Ovakav način prikupljanja podataka o stanju kolosijeka pomoću prikaza razine vibracijskih brzina relativno je jeftin i pristupačan jer je moguće da jedno tramvajsko vozilo u jednom danu obiđe nekoliko puta istu

tramvajsku liniju. Takvo mjerenje na dnevnoj, tjednoj, mjesečnoj ili godišnjoj razini (ovisno o potrebama prikupljanja i usporedbe rezultata) sadrži dovoljno podataka za ocjenu stanja kolosijeka i lociranje kritičnih mjesta na mreži. Kao primjer promjene razina vibracijskih brzina i potencijalnu detekciju povećanja istih u vremenu, na slici 2c prikazane su krivulje promjene razina u desetomjesečnom razdoblju (za mjerenje na desnoj,  $V_{eq,R}$ ) i lijevoj kotaču,  $V_{eq,L}$  uz prikaz brzine prolaska vozila) na raskrižju Savske ceste i Vodnikove ulice u smjeru Frankopanske ulice, gdje je vidljiv trend povećanja razina vibracijskih brzina u zadnja četiri mjeseca monitoringa. Signal koji je snimljen pomoću akcelerometara instaliranih na vozilu moguće je obraditi na više načina u različitim frekvencijskim pojasevima (pomoću specijalnih računalnih programa) kako bi se detektirale različite nepravilnosti i oštećenja na kolosijeku. Detaljnija analiza predstavlja potencijalnu mogućnost izrade modela predviđanja degradacije kolosijeka i pravovremene intervencije. Takav model smanjio bi troškove održavanja bez potrebe za ugradnjom skupljih prigušivača u kolosiječnu konstrukciju.



Slika 2. Prikaz: a) razina vibracijskih brzina prilikom prolaska tramvaj na raskrižju Savske ceste i Vodnikove ulice u smjeru Frankopanske ulice, b) prikaz svih izmjerenih razina vibracijskih brzina u 2021 godini, c) prikaz promjene razina vibracijskih brzina u promatranom razdoblju na lijevoj ( $V_{eq,L}$ ) i desnoj ( $V_{eq,R}$ ) tračnici



### 2.3 Dugotrajni monitoring na zgradama

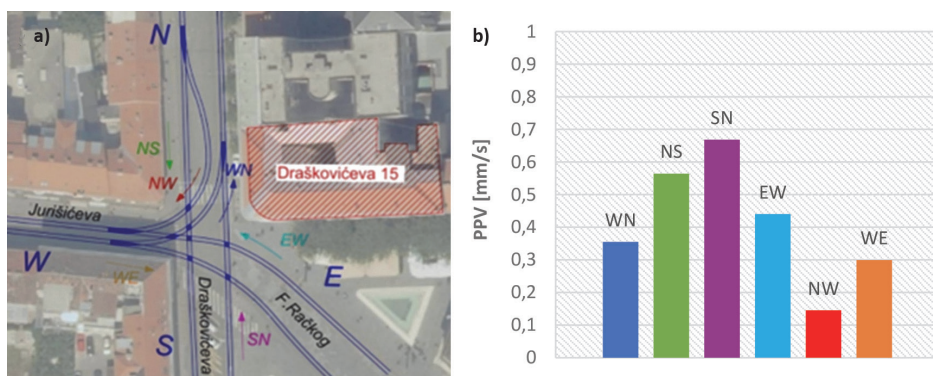
Za razliku od nekih drugih metoda za ocjenu stanja zgrade, mjerenje razina vibracija na zgradama može se provoditi u sklopu dugotrajnog monitoringa bez zadiranja u konstrukcijske elemente zgrade. U literaturi postoje mnogi primjeri gdje se na temelju velikih baza podataka rade modeli predviđanja jačine vibracija, načina propagacije kroz tlo i intenziteta vibracija koje se prenose na zgrade u blizini. U studiji koja je rađena na temelju tramvajskog vozila koji prometuje u Brusselsu, Belgija, razvijen je model predviđanja intenziteta vibracija na izvoru (tramvajskom vozilu) i širenju vibracija kroz tlo. Nakon izrade i evaluacije modela, zaključeno je da se izmjereni podaci jako dobro slažu i poklapaju sa izračunatim podacima iz modela [6]. Ovakav model predviđanja razina vibracija uvelike pojednostavljuje evaluaciju istih i samim time ubrzava postupak razvoja i implementacije optimalnog sustava za smanjivanje vibracija nastalih prolaskom tramvajskog vozila [11]. Dopuštena razina vibracija kojoj ljudi smiju biti izloženi u radnoj okolini i okruženju u kojoj žive regulirana u Europskoj Uniji direktivom 2002/44/EC vezanom uz vibracije u radnoj okolini [18].



Slika 3. Mjerna lokacija na 4. katu zgrade (Draškovićeve 15) (a), mjerni uređaj "SWARM" (b)

Dodatno, vibracije uzrokovane prometom mogu ometati osjetljive uređaje i opremu, potencijalno uzrokovati strukturalnu i kozmetičku štetu na modernim i starijim zgradama te imati uznemiravajuće učinke na stanare u zgradama. Ovakve vibracije mogu biti uzrok širenju pukotina na zgradama koje su prethodno oštećene (npr. nakon jačeg potresa) [19]. Moguća je i pojava mrvljenja žbuke i raspadanja ziđa zbog čestog ponavljanja opterećenja [1]. U sklopu projekta ocjene cjelokupnog stanja tramvajske mreže u Zagrebu nakon potresa koji se dogodio 22.03.2020., napravljena je detaljna analiza stanja kolosijeka. Za određivanje utjecaja na zgrade koje su oštećene u potresu, na četiri lokacije postavljeni su uređaji za monitoring vibracija

koje nastaju prilikom prolaska tramvajskog vozila. Lokacije su odabrane nakon sveobuhvatne analize rizika koja uzima u obzir tri parametra: stupanj oštećenja zgrada, udaljenost tramvajskog kolosijeka od zgrade i razine vibracija na tramvajskom kolosijeku (izvor vibracija). Uređaji su postavljeni na lokacijama na zgradi gdje se očekuju najveće vibracije sukladno normi HRN DIN 4150-3 - Vibracije u zgradama - Utjecaj na konstrukcije [8]. Montaža ovakvih uređaja (SWARM) (Slika 4b) vrlo je jednostavna i praktična jer ne zahtjeva mnogo vremena kako bi se započelo sa monitoringom vibracija. Vibracije su mjerene sukladno normi [8] a za analizu potencijalnih utjecaja tramvajskog prometa na građevine u potresu uzeti su najstroži kriteriji utjecaja trajnih vibracija (na osjetljive građevine) gdje je graničnu vrijednost predstavljala vršna brzina vibracija  $PPV = 2.5 \text{ mm/s}$ .

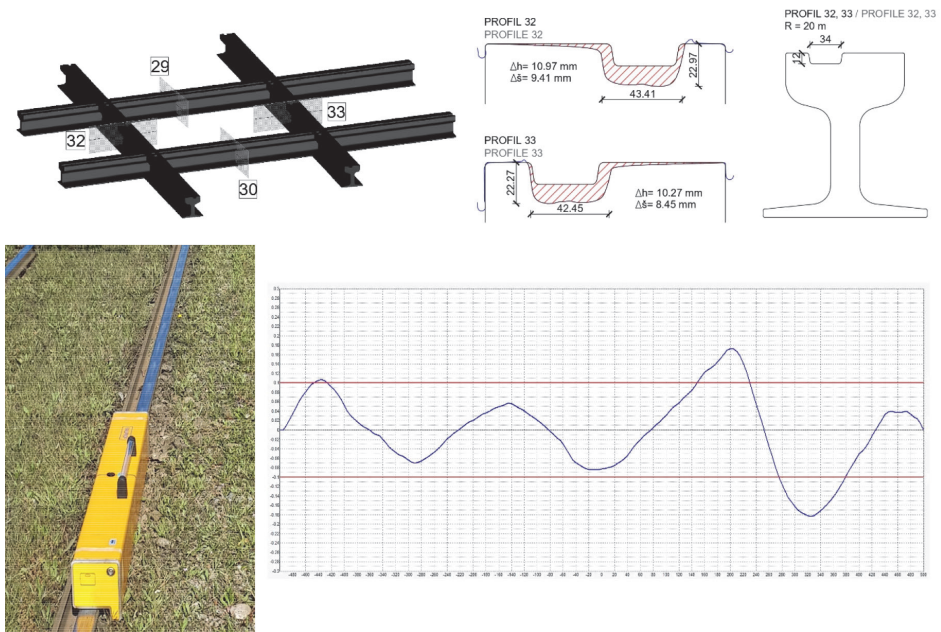


Slika 4. Prikaz: a) raskrižja Draškovićeve - F. Račkoga - Jurišičeve sa naznačenim smjerovima kretanja vozila, b) izmjerenih vršnih vibracijskih brzina pri prolazima tramvaja TMK 2200 u različitim smjerovima vožnje

U centraliziranoj bazi podataka koja je povezana sa SWARM uređajem (slika 3b), moguće je promatrati kretanje vršnih vibracijskih brzina u izabranom vremenskom periodu i analizirati je li došlo do promjena u razinama vibracijskih brzina. Dodatno, ovakav sustav monitoringa ima mogućnost upozorenja korisnika putem alarma ako vršne vibracijske brzine prekorače postavljene granice. Na takav način moguće je pravovremeno intervenirati kako bi se smanjile vibracijske brzine i rizik za zgrade kao i neugoda za stanare. Na slici 3a prikazana je jedna od lokacija na adresi Draškovićeve 15 uz dodatni prikaz raskrižja sa svim smjerovima kretanja vozila na slici 4a. Rezultati analize prosječnih vršnih vibracijskih brzina obzirom na udaljenost kolosijeka od zgrade (mjerno mjesto na nosivom zidu 4. kata zgrade u Draškovićevoj 15, slika 3a) prema smjerovima kretanja vozila prikazani su na slici 4b. Iz grafova se može jasno očitati kako najveće vibracije pobuđuje prolazak tramvaja u smjeru jug - sjever ( $S \rightarrow N$ ) jer je taj kolosijek najbliži zgradi (11m udaljen od pročelja).

### 3 Nastavak istraživanja

Nastavno na analizu razina vibracija obzirom na udaljenost kolosijeka od zgrade, napravljene su i analize utjecaja brzine prolaska tramvajskog vozila i tipa tramvajskog vozila na kretanje razina vibracijskih brzina. Kao iduća faza u ovom dijelu istraživanja planira se mjerenje i analiza stanja kolosijeka (mjerenje geometrije glave tračnice u križalištima i mjerenje naboranosti vozne površine tračnice (Slika 5) čime se želi istražiti utjecaj stanja kolosijeka na razine vibracijskih brzina koje se emitiraju prilikom prolaska tramvajskog vozila.



Slika 5. Prikaz profila križališta uz usporedbu izmjenog profila i referentnog profila tračnice (gore), mjerenje direktne naboranosti na tračnici sa prikazom izmjerene naboranosti (dolje)

Za detaljniju analizu utjecaja stanja kolosijeka na razine vibracijskih brzina, planirano je u daljnjem istraživanju dodatnom analizom i obradom rezultata mjerenja naboranosti na kolosijeku (direktna metoda) izračunati vrijednosti koje bi bile usporedive sa vrijednostima razine vibracijskih brzina izmjerenih indirektnom metodom (mjerenje vibracija pomoću akcelerometara na tramvajskom vozilu). Konačno, usporedba direktne i indirektno mjerenja predstavljala bi bazu za daljnja istraživanja i izradu modela procjene razvoja naboranosti (s obzirom na amplitudu i valne duljine nabora) koji bi služio za razvoj optimalnog rasporeda održavanja (brušenja) kolosijeka. Dodatno, model bi se temeljio na indirektnim mjerenjima po-

moću akcelerometara instaliranih na tramvajskom vozilu (u redovnom rasporedu prometovanja vozila) što bi predstavljalo veliko pojednostavljenje (nema potrebe za ručnim mjerenjem) i dodatna financijska rasterećenja pri održavanju tramvajske mreže kao i smanjenje razina buke i vibracija.

## 4 Zaključak

Mjerenje i dugotrajni monitoring vibracija koje nastaju prolaskom tramvajskog vozila po kolosijeku praktični su i primjenjivi za prikupljanje velikog broja podataka koji se mogu koristiti za kasniju obradu. Takva baza podataka je temelj za izradu modela detekcije pojedinih nepravilnosti i oštećenja na tramvajskim kolosijecima i predviđanja njihovog napredovanja. Na bazi trenda vibracija kroz duži vremenski period moguće je na temelju kontinuiranog monitoringa planirati pravovremene i ciljane intervencije na kolosijeku. Analizom relativne promjene vibracija nakon izvršenih rekonstrukcija uz kontinuirani monitoring također je moguće verificirati učinkovitost primijenjenih metoda sanacije. Vibracije je moguće i dodatno analizirati promatrajući pojedinačne nepravilnosti (npr. naboranost tračnice) ili oštećene (puknute) zavare. Uz pomoć tih podataka moguće je napraviti model pomoću kojega bi se organiziralo sustavno brušenja tračnica (ovisno o vibracijama koje nastaju prolaskom tramvajskog vozila po kolosijeku i starosti tračnica) sa svrhom produljenja životnog vijeka tračnice i smanjivanja buke i vibracija. Kod detaljnije analize vibracija potrebno je što točnije definirati parametre vezane uz izvor vibracija (kolosijek, tračničko vozilo), medij kroz koji se vibracije šire (tlo) i recipijenta (zgrada, građevina) kako bi se pomoću prikupljenih podataka o vibracijama mogao napraviti model predviđanja širenja vibracija od izvora i vibracija koje se pojavljuju na zgradama.

## Literatura

- [1] Haladin, I., Bogut, M., Lakušić, S.: Analysis of tram traffic-induced vibration influence on earthquake damaged buildings, *Buildings* (2021), 11, <https://doi.org/10.3390/buildings11120590>.
- [2] Burnać, K.: Analiza vibracija tramvajskog vozila s obzirom na stanje tramvajskog kolosijeka, Univeristy of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2019.
- [3] Bocz, P., Vinkó, Á., Posgay, Z.: A practical approach to tramway track condition monitoring: vertical track defects detection and identification using time-frequency processing technique, *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering* (2018), 13, pp.135-46. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2018-0013>.
- [4] Erkal, A.: Transmission of Traffic-induced Vibrations on and around the Minaret of Little Hagia Sophia, *International Journal of Architectural Heritage* (2017), 11, pp.349-62, <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1230657>.

- [5] Lakušić, S., Ahac, M.: Vibracije od željezničkog prometa, *Gospodarenje prometnom infrastrukturom* (2009), p. 373-418.
- [6] Kouroussis, G., Verlinden, O., Conti, C.: Contribution of vehicle/track dynamics to the ground vibrations induced by the Brussels tramway, *Science of The Total Environment* (2014), Vol. 482-483, pp. 452-460, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.083>.
- [7] Hao, H., Ang, T.C., Shen, J.: Building vibration to traffic-induced ground motion, *Building and Environment* (2001), 36, pp.321-36
- [8] HRN DIN 4150-3:2016 Vibrations in Buildings-Part 3: Effects on structures, 2020.
- [9] Geert Degrande, A., Lombaert, G., Ntsios, E., Thompson, D., Nélain, B., Bouvet, P., et al.: SILVARSTAR Soil Vibration and Auralisation Software Tools for Application in Railways H2020 Collaborative Projects Research and Innovation Action S2R-OC-CCA-01-2020: Noise and Vibration Deliverable D1.1 STATE-OF-THE-ART AND CONCEPT OF THE VIBRATION PREDICTION TOOL, 2021.
- [10] Lakušić, S., Haladin, I., Ahac, M., Bartolac, M., Bogut, M., Damjanović, D., et al.: Study on the tram traffic development in Zagreb, Report, Analysis of Tramway Track Condition, 2019.
- [11] Haladin, I., Lakušić, S., Bogut, M.: Overview and analysis of methods for assessing ride comfort on tram tracks, *Gradjevinar* (2019), 71, pp.901-21, <https://doi.org/10.14256/JCE.2731.2019>
- [12] Dumitriu, M., Stănică, D.I.: Study on the Evaluation Methods of the Vertical Ride Comfort of Railway Vehicle-Mean Comfort Method and Sperling's Method, *Applied Sciences* (2021), 11, <https://doi.org/10.3390/app11093953>.
- [13] Falamarzi, A., Moridpour, S., Nazem, M.: Development of a tram track degradation prediction model based on the acceleration data, *Structure and Infrastructure Engineering* (2019), 15, 1308-18, <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1615963>
- [14] Vinkó, Á.: Monitoring and condition assessment of tramway track using in-service vehicle, *Pollack Periodica* (2016), 11, 73-82, <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.7>
- [15] Garg, V.K., Dukkipati R., V.: Dynamics of railway vehicle systems, London, Academic Press, 1984.
- [16] HRN EN 12299:2009 Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation (EN 12299:2009), 2009.
- [17] HRN EN ISO 2631-4:2010 Mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotation motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport system, 2010.

- [18] DIRECTIVE 2002/44/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration), 2002.
- [19] Tomažević, M., Žnidarič, A., Klemenc, I., Lavrič, I.: The influence of traffic induced vibrations on historic stone masonry buildings, In Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, Stationery Office, pp. 631, 2002.





# Mogućnosti primjene pepela drvene biomase kao djelomične zamjene sitnog agregata u lijevanom betonu

Sonja Cerković<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Nina Štirmer<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

Prema načelima kružne ekonomije postoji veliki potencijal razvoja sinergije između građevinskog i energetskog sektora kroz upotrebu nusproizvoda iz drugih industrija ili recikliranih materijala u betonskoj industriji. Cilj je ovog istraživanja pronaći mogućnosti uporabe lokalno dostupnog pepela drvene biomase (PDB) kao djelomične zamjene za sitni agregat (pijesak) u betonu. U radu je prikazan utjecaj PDB-a na relevantna mehanička svojstva i svojstva trajnosti lijevanog betona u kojima je dio sitnog agregata (pijeska) zamijenjen s različitim vrstama PDB-a u udjelu od 15 % te je proučavan njihov utjecaj u odnosu na propisane zahtjeve proizvođača predgotovljenih elemenata.

*Ključne riječi: pepeo drvene biomase, lijevani beton, zamjena sitnog agregata, pijesak, mehanička svojstva, svojstva trajnosti*

## Possibilities of using wood biomass ash as a partial replacement of fine aggregate in precast concrete

### Abstract

According to the principles of the circular economy, there is great potential for developing synergies between the construction and energy sectors through the use of by-products from other industries or recycled materials in the concrete industry. The objective of this study is to determine the potential of using locally available wood biomass ash (WBA) as a partial substitute for fine aggregate (sand) in concrete. This paper presents the influence of WBA on the relevant mechanical properties and durability of precast concrete, where a part of fine aggregate (sand) was replaced by different types of WBA in a proportion of 15%, and its influence was investigated in relation to the prescribed requirements of precast manufacturers.

*Key words: wood biomass ash, precast concrete, replacement for fine aggregate, sand, mechanical properties, durability properties*

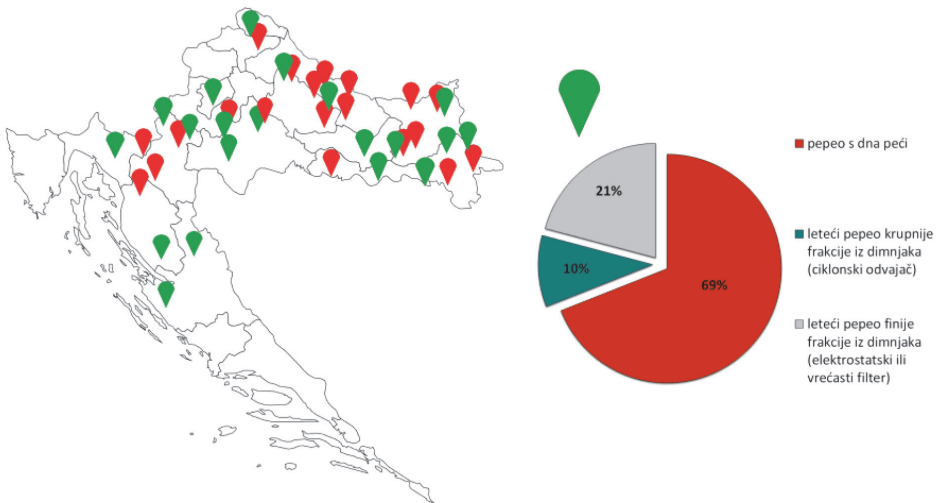


## 1 Uvod

Klimatske promjene predstavljaju sve veću opasnost za čovječanstvo zbog čega je potrebno pronaći brza rješenja u svrhu ispunjavanja ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova za 55 % do 2030., odnosno postizanja klimatske neutralnosti [1]. Jedan od planova je i Revizija Direktive 2018/2001 [2] čime će se potaknuti još veće iskorištavanje energije iz obnovljivih izvora energije (OIE), pri čemu korištenje biomase ima dominantnu ulogu s udjelom od čak 60 % u ukupnim OIE [3]. Međutim, u postrojenjima koja koriste drvenu biomasu kao sirovinu za proizvodnju električne i toplinske energije, javljaju se novi problemi vezani uz količinu otpada koji pritom nastaje i načine upravljanja njime zbog nedostatka postojeće regulative [4, 5]. Ovaj otpad poznat je kao pepeo drvene biomase (PDB) te postoje tri vrste PDB-a: pepeo s dna peći (pepeo s dna ložišta peći), leteći pepeo krupnije frakcije (pepeo s ciklonskog odvajača) te leteći pepeo finije frakcije (pepeo s elektrostatskog filtera). Pepeo s dna peći ima drugačija svojstva od letećih PDB-ova (krupnije i finije frakcije), a karakterizira ga veća veličina zrna i veća vlažnost, što ga čini prikladnim za primjenu u podlogama cesta, nekonstruktivnima betonima ili nasipima. Međutim, njegova upotreba u betonu nije dovoljno proučavana. Prema posljednjim podacima koje je objavio HROTE (Hrvatski operator tržišta energije d.o.o.) trenutno su u Republici Hrvatskoj (RH) aktivne 42 energane na biomasu (slika 1), ukupne instalirane snage 97,068 MW<sub>e</sub> [6]. Lokacijske ikone (crvene i zelene) predstavljaju ukupan broj trenutno aktivnih postrojenja na biomasu u RH. Zelene lokacijske ikone predstavljaju energane u kojima su prikupljeni različiti uzorci PDB-a te podaci o tehnologijama izgaranja, vrsti biomase, načinu upravljanja PDB-om na osnovi provedenih anketa. Međutim, potencijal RH je mnogo veći, budući da se ovi podaci odnose samo na postrojenja priključena na javnu električnu mrežu te ne uključuju pogone za proizvodnju celuloze i papira, rasadnike, sušare ili tvornice za proizvodnju drvenog namještaja. Iz dijagrama prikazanog na slici 1 vidljivo je da 10 % energana proizvodi leteći pepeo krupnije frakcije, 21 % leteći pepeo finije frakcije, a čak 69 % pepeo s dna peći. Istražena postrojenja na biomasu ukupno proizvedu 22859,1 t/god PDB-a, a očekuje se da će ove količine PDB-a biti još veće sukladno ispunjavanju zahtjeva u bliskoj budućnosti, stoga je potrebno pronaći primjereno rješenje njegove ponovne upotrebe. S druge strane, betonska industrija poznata je po svom jednostranom modelu proizvodnje i eksploatacije prirodnih sirovina pri čemu se građevni proizvodi izrađuju većinom od prirodnih sirovina te na kraju životnog vijeka postaju građevni otpad [7]. Promatrajući 1 m<sup>3</sup> betona, ovakav sustav uobičajeno se sastoji od 8 – 16 % cementa, 7 – 20 % vode i 65 – 75 % agregata, uključujući i pijesak s udjelom od približno 25 % [8]. Procjenjuje se da se svake godine iz kamenoloma, jama, rijeka, obala i morskog okoliša izvuče ukupno 40 - 50 milijardi tona agregata predstavljajući ozbiljnu prijetnju slatkovodnom i morskom ribarstvu i biološkoj raznolikosti, a tako-

đer utječe se na riječnu i obalnu eroziju [7]. Osim toga, eksploatacija agregata značajno doprinosi emisijama stakleničkog plina ( $\text{CO}_2$ ), pri čemu je izravan utjecaj povezan s emisijama iz samih procesa ekstrakcije i transporta, a neizravan s procesom proizvodnje cementa za upotrebu u betonu [9]. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se PDB zbog svojih fizikalnih karakteristika i kemijskog sastava može ponovno upotrijebiti betonskoj industriji kao djelomična zamjena cementa i/ili agregata [4, 10, 11]. Na taj način doprinijelo bi se ispunjavanju pojedinih zahtjeva za postizanjem klimatske neutralnosti, ali bi se riješila i pitanja vezana uz upravljanje PDB-om, emisije stakleničkih plinova te iscrpljivanje prirodnih resursa stvarajući inovativni, ekološki prihvatljiviji materijal.

Ovo istraživanje daje pregled mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti ispitanih na mješavinama lijevanog betona s PDB-om kao djelomičnom zamjenom sitnog agregata (pijeska), budući da njegova upotreba u betonu nije dovoljno proučavana. Cilj je pronaći mogućnosti primjene PDB-a u proizvodnji predgotovljenih elemenata. Za potrebe ovog istraživanja prikupljeni su različiti PDB-ovi iz 3 energane na području RH.



Slika 1. Lokacije aktivnih postrojenja na biomasi u Republici Hrvatskoj te udjeli različitih vrsta PDB-ova koji se generiraju u 22 postrojenja na biomasi

## 2 Eksperimentalni dio

Za potrebe ovog istraživanja izrađene su različite mješavine lijevanog betona – referentna, koja nije sadržavala PDB i 3 mješavine (oznaka M1, M2, M3) u kojima je 15 % sitnog agregata (pijeska) zamijenjeno različitim vrstama PDB-a (oznaka PDB1, PDB2, PDB3) te je proučavan njihov utjecaj na relevantna mehanička svojstva i svojstva trajnosti u odnosu na propisane zahtjeve proizvođača za lijevani beton koji se uobičajeno ugrađuje u proizvode poput kanalice i/ili lijevane nadvožnjačke glave.

### 2.1 Materijali i metode

#### 2.1.1 Materijali

Prilikom izrade mješavina lijevanog betona korišteni su originalni sastavi proizvođača betonske galanterije Beton Lučko RGB d.o.o. U svim mješavinama korišteni su obični portlandski cement, prirodni agregat Trstika (frakcije 0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm) iz šljunčare “Smontara“, pitka voda iz vodovoda te dodaci superplastifikator i aerant. Osim toga, za potrebe ovog istraživanja odabrana su 3 PDB-a s dna peći prikupljena u energanama na drvenu biomasu u RH, u kojima se uglavnom koristi tehnologija izgaranja na rešetki. Drvna biomasa koju koriste kao sirovinu je čista drvena sječka, cijela drvena sječka i ostaci od pridobivanja drva, a najčešće vrste drveta su miješano drvo, hrast, grab i bukva. Tablica 1 prikazuje kemijski sastav PDB-ova koji su korišteni kao zamjena za 15 % sitnog agregata (pijeska).

Kemijski zahtjevi za agregate, u ovom slučaju pijeska, definirani su normom HRN EN 12620 [12], odnosno HRN EN 1744-1 [13]. Za primjenu PDB-a u betonu, potrebno je ograničiti sadržaj klorida, sulfata topivih u kiselini, ukupnog sumpora te sastojaka koji utječu na brzinu vezivanja i očvršćivanja betona poput organskih tvari, šećera, laganih čestica itd. Dodatno je potrebno obratiti pozornost na sadržaj alkalnoreaktivnih sastojaka [12] u PDB-u, koji mogu prouzročiti pojavu alkalnosilikatne reakcije [8]. Nepovoljnu komponentu PDB-a predstavlja i gubitak žarenjem, odnosno sadržaj neizgorenog ugljika (tablica 1), jer negativno utječe na svojstva trajnosti betona [8], poput povećanog upijanja vode [14]. Tablica 2 prikazuje fizikalna svojstva PDB-a i sitnog agregata (pijeska) prema normama za određivanje svojstava agregata [12, 13, 15].

Tablica 1. Kemijski sastav PDB-ova korištenih za djelomičnu zamjenu sitnog agregata (pijeska)

Svojstvo	Jedinica	PDB1	PDB2	PDB3
Gubitak žarenjem (950 °C)	mas.%	11,5	3,9	6,6
Sadržaj P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mas.%	2,86	3,36	2,93
Sadržaj Na <sub>2</sub> O	mas.%	0,47	1,07	1,17
Sadržaj K <sub>2</sub> O	mas.%	12,03	11,55	7,68
Sadržaj CaO	mas.%	49,07	36,59	27,85
Sadržaj MgO	mas.%	3,89	4,43	4,17
Sadržaj Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mas.%	3,73	6,15	9,79
Sadržaj TiO <sub>2</sub>	mas.%	0,42	0,9	0,68
Sadržaj Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mas.%	2,3	3,56	4,03
Sadržaj SiO <sub>2</sub>	mas.%	21,87	30,1	38,58
Sadržaj MnO	mas.%	1,26	0,72	0,34
Sadržaj SO <sub>3</sub>	mas.%	1,38	1,26	2,18
SiO <sub>2</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mas.%	27,9	39,81	52,4
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	mas.%	8,39	8,67	6,22
pH	-	13,61	13,22	12,89

Tablica 2. Fizikalna svojstva sitnog agregata (pijeska) i PDB-ova

Agregat	P	PDB1	PDB2	PDB3
Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	2,88	2,88	2,86	2,43
Sadržaj sitnih čestica (%)	f <sub>3</sub>	<b>11,7</b>	1,2	<b>32,3</b>
Apsorpcija vode (%)	0,7	<b>13,9</b>	<b>8,5</b>	<b>4,3</b>

Pijesak podrazumijeva dio agregata frakcije maksimalne veličine zrna do 4 mm, dok PDB-ovi sadrže i čestice veličine do 16 mm, odnosno 31,5 mm, iako udio tih čestica nije velik. Stoga, prilikom upotrebe PDB-a kao djelomične zamjene za pijesak, bilo bi preporučljivo ukloniti čestice koje su veće od 4 mm [16]. Sadržaj sitnih čestica trebao bi zadovoljavati razred propisan za pijesak odnosno f<sub>3</sub>, što znači da sadržaj sitnih čestica agregata koje prolaze kroz sito otvora 0,063 mm mora biti ≤ 3 %. Iz tablice 2 vidljivo je da PDB1 i PDB3 ne zadovoljavaju propisani kriterij, te se može očekivati nepovoljan utjecaj na obradljivost i povećanu potrebu za vodom. Apsorpcija vode i gustoća, PDB-a i pijeska, određene su prema HRN EN 1097-6 [17]. Utvrđeno je da je apsorpcija vode pijeska 0,7 %, dok je za PDB-ove od 6 do 20 puta veća, što upućuje na veliku poroznost PDB-a. Većina običnih agregata ima apsorpciju od 1 do 2 %. U ovom istraživanju niti jedan PDB nije unutar navedenih granica te se može očekivati nepovoljan utjecaj na svojstva trajnosti ispitanih uzoraka lijevanog betona [17].

### 2.1.2 Metode

Izrađene su 4 mješavine lijevanog betona – referentna (oznake M0), koja nije sadržavala PDB te 3 mješavine (oznaka M1, M2, M3) u kojima je 15 % sitnog agregata (pijeska) zamijenjeno različitim vrstama PDB-a (oznaka PDB1, PDB2, PDB3). Ovim istraživanjem želi se prikazati kako zamjena dijela sitnog agregata (pijeska) različitim vrstama PDB-ova utječe na relevantna mehanička svojstva – čvrstoću na savijanje te svojstva trajnosti – upijanje vode, otpornost na djelovanje smrzavanja sa soli za odmrzavanje i otpornost na habanje. Kako bi se navedeno utvrdilo, provedena su potrebna ispitivanja svojstava betonskih mješavina lijevanog betona u svježem i očvrnulom stanju u skladu s planom ispitivanja prikazanim u tablici 3.

**Tablica 3. Plan ispitivanja lijevanog betona s PDB-om kao zamjenom dijela sitnog agregata (pijeska)**

Svojstva	Norme
Konzistencija slijeganjem	HRN EN 12350-2:2019 [18]
Gustoća svježeg betona	HRN EN 12350-6:2019 [19]
Udio pora	HRN EN 12350-7:2019 [20]
Temperatura svježeg betona	HRN EN 12350-1:2019 [21]
Čvrstoća na savijanje	HRN EN 12390-5:2019 [22]
Upijanje vode	HRN EN 1340:2003 [23]
Otpornost na smrzavanje sa soli za odmrzavanje	
Otpornost na habanje	

## 3 Rezultati i diskusija

### 3.1 Rezultati ispitivanja lijevanog betona s PDB-om u svježem stanju

U tablici 4 prikazani su rezultati ispitivanja svojstava svježeg lijevanog betona - referentne mješavine (M0) i mješavina s različitim vrstama PDB-ova kao 15 %-tne zamjene sitnom agregatu (pijesku). Prema zahtjevu proizvođača za lijevani beton, propisani razred slijeganjem je S3 (100 – 150 mm), međutim odstupanje svih mješavina lijevanog betona ne predstavlja ograničenje za njihovu primjenu. Mješavine M2 i M3 pokazale su povećanu obradljivost u odnosu na propisani kriterij te se mogu svrstati u razrede konzistencije slijeganjem S5 i S4. S druge strane, mješavina M1 pokazala je pad obradljivosti u odnosu na referentnu mješavinu i propisani kriterij te se može svrstati u razred konzistencije slijeganjem S1. Gubitak obradljivosti može biti posljedica povećane potrebe za vodom primjenom PDB-ova zbog njegovog nepravilnog oblika i porozne strukture čestica te samim time i njegovom većom specifičnom površinom koje imaju tendenciju apsorbirati više vode [7, 16, 24]. Tablica 2

pokazuje da apsorpcija PDB1 iznosi 13,9 %, što je približno 20 puta više u usporedbi s pijeskom čija apsorpcija iznosi 0,7 %. Osim toga, na gubitak obradljivosti vjerojatno je dodatno utjecao veliki sadržaj sitnih čestica od 11,7 % [25]. Naime, sadržaj sitnih čestica mora zadovoljavati razred propisan za pijesak odnosno  $f_3$ , što znači da sadržaj sitnih čestica agregata koje prolaze kroz sito otvora 0,063 mora biti  $\leq 3$  %. Iz tablice 2 je vidljivo da PDB1 i PDB3 ne zadovoljavaju propisani kriterij te se može očekivati nepovoljan utjecaj na obradljivost i povećana potreba za vodom. S obzirom na kemijski sastav PDB1, ovakva svojstva mogu se povezati i s visokim sadržajem neizgorjelog ugljika (gubitak žarenjem), slobodnog CaO [7, 16, 24] te alkalija [8]. Rezultati ispitivanja gustoće mješavina lijevanog betona ne ukazuju na značajniju promjenu. Sadržaj zraka mješavina lijevanog betona s PDB-ovima nije zadovoljio kriterij zahtjevan od proizvođača, u rasponu od 4,5 do 7,0 %. Mješavina M3 pokazala je veći udio pora u odnosu na referentnu mješavinu za 31,5 %.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja svojstava svježeg lijevanog betona s PDB-om

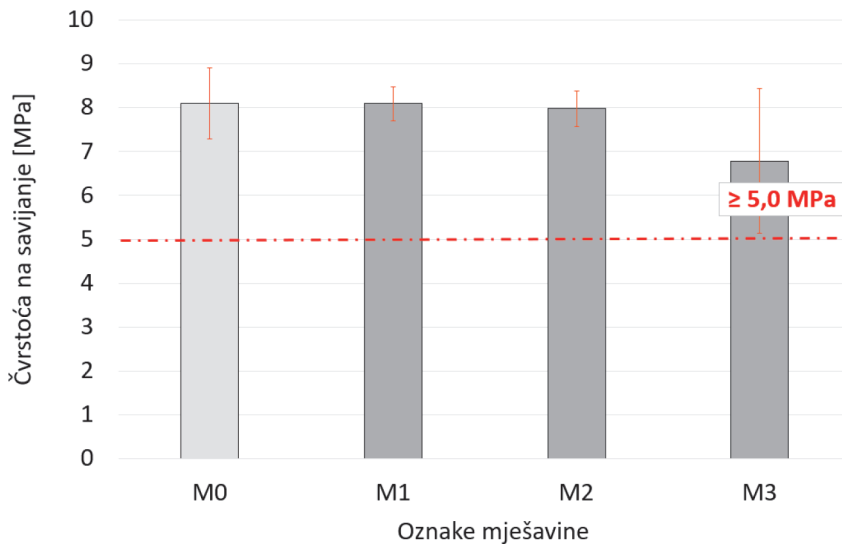
Oznaka mješavine	M0	M1	M2	M3
Konzistencija [mm]	220	15	230	210
Gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,34	2,3	2,36	2,25
Temperatura [°C]	19,5	19,1	5,7	7,5
Udio pora [%]	5	3,2	3,1	7,3

## 3.2 Rezultati ispitivanja lijevanog betona s PDB-om u očvrslulom stanju

### 3.2.1 Mehanička svojstva

Mehaničko ponašanje uzoraka lijevanog betona s PDB-om kao djelomične zamjene za sitni agregat (pijesak) prikazano je kroz ispitivanje čvrstoće na savijanje nakon 28 dana te usporedbu s propisanim kriterijima dobivenim od proizvođača. Potrebno je naglasiti da je ispitivanje čvrstoće na savijanje mješavina M0 i M1 provedeno na uzorcima gotovih proizvoda (lijevanih nadvožnjačkih glava) prema HRN EN 1340:2004, dok je na ostalim mješavinama lijevanog betona M2 i M3 provedeno na uzorcima prizmi dimenzija 10 x 10 x 40 cm ili 10 x 10 x 50 cm prema normi HRN EN 12390-5:2019.

Na slici 2 prikazane su srednje vrijednosti čvrstoće na savijanje uzoraka lijevanog betona s različitim vrstama PDB-a. Rezultati pokazuju da je mješavina lijevanog betona M3 pokazala blagi pad čvrstoće na savijanje u odnosu na referentnu mješavinu od 16,17 %. Međutim, sve mješavine lijevanog betona - referentna (M0) i s PDB-om (M1, M2 i M3) zadovoljavaju propisane kriterije proizvođača za lijevani beton razreda 2, odnosno  $T \geq 5$  MPa.



Slika 2. Rezultati ispitivanja čvrstoće savijanjem uzoraka lijevanog betona s PDB-om

### 3.2.2 Svojstva trajnosti

Svojstva trajnosti uzoraka lijevanog betona s PDB-om kao djelomične zamjene za sitni agregat (pijesak) prikazana su kroz ispitivanje upijanja vode, otpornosti na djelovanje smrzavanja sa solima za odmrzavanje i otpornosti na habanje ovisno o propisanim zahtjevima dobivenim od proizvođača. Rezultati ispitivanja trajnosti i kriteriji propisani od proizvođača prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja svojstava trajnosti uzoraka lijevanog betona s PDB-om

Oznaka mješavine	Upijanje vode [%]					Kriterij
	M0	M1	M2	M3	Razred	
Srednja vrijednost, B	5,2	7,4	4,5	5,4	2	≤ 6 %
Otpornost na djelovanje smrzavanja sa solima za odmrzavanje [kg/m <sup>2</sup> ]						
Gubitak mase nakon 28 ciklusa, D	0,0	3,6	0,2	0,2	3	≤ 1,0 kg/m <sup>2</sup>
Otpornost na habanje [mm <sup>3</sup> ]						
Gubitak volumena, I	8337	9769	6016	5847	4	≤ 18000 mm <sup>3</sup> /5000 mm <sup>2</sup>

Rezultati ispitivanja upijanja vode prikazani su kao srednja vrijednost (B) triju uzorka prizmi. Vrijednosti upijanja vode kretale su se u rasponu od 4,5 % do 7,4 %. U usporedbi s referentnom mješavinom (M0), sve mješavine s PDB-om imale su veće upijanje vode uz iznimku mješavine M2. Isti trend uočen je u ranijim istraživanjima pri zamjeni pijeska u različitim udjelima [25, 26], što se povezuje s poremećajem u strukturi zbog neoptimalne raspodjele veličine čestica, odnosno većeg broja šupljina [27]. Mješavina M1 pokazala je najveću vrijednost upijanja vode što se može povezati s velikom vrijednošću apsorpcije vode PDB1 od 13,9 %. Promatrajući rezultate u odnosu na kriterije propisane od proizvođača, sve mješavine lijevanog betona - referentna (M0) i s PDB-om (M2 i M3) - zadovoljile su propisani kriterij od  $B \leq 6\%$  za razred 2 te i u ovom slučaju mješavina M1 nije zadovoljila. Ovi rezultati pokazuju da zamjena dijela sitnog agregata (pijeska) u udjelu od 15 % ima pozitivan učinak na ovo svojstvo, osim u slučaju mješavine M1.

U tablici 5 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na djelovanje smrzavanja sa soli za odmrzavanje kao srednje vrijednosti (D). Srednja vrijednost predstavlja gubitak mase oljuštenog materijala s ispitne površine 4 uzorka svake mješavine lijevanog betona s PDB-om tijekom njihovog izlaganja 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u prisustvu soli za odmrzavanje. Prema propisanom kriteriju od proizvođača za razred 3, srednja vrijednost gubitka mase oljuštenog materijala nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima za odmrzavanje treba biti  $D \leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ . Sve mješavine lijevanog betona s PDB-om, osim mješavine M1, zadovoljile su propisani kriterij. Ovakav trend može se povezati s visokim gubitkom žarenjem (11,5 %) [28] i alkalijama (8,39 %) [29] sadržanim u PDB1. Gubitak mase oljuštenog materijala mješavine lijevanog betona M1 iznosio je  $2,58 \text{ kg/m}^2$  nakon samo 14 ciklusa.

Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje uzoraka lijevanog betona s PDB-om kao djelomičnom zamjenom sitnog agregata (pijeska) dobiveni su kao srednja vrijednost (I) na 3 ispitna uzorka dimenzija  $71 \times 71 \times 50 \text{ mm}$  nakon 16 ciklusa habanja. Srednja vrijednost (I) predstavlja gubitak volumena po površini od  $5000 \text{ mm}^2$ . Iz rezultata je vidljivo da su sve mješavine lijevanog betona – referentna (M0) i s PDB-om (M1, M2 i M3) zadovoljile propisani kriterij za razred 4 od  $I \leq 18000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$ .

## 4 Zaključak

Ovim istraživanjem prikazan je potencijal primjene PDB-a kao zamjene dijela sitnog agregata (pijeska) od 15 % u mješavinama lijevanog betona kroz zadovoljenje većine propisanih kriterija od proizvođača na relevantna mehanička svojstva – čvrstoću na savijanje te svojstva trajnosti – upijanje vode, otpornost na djelovanje smrzavanja sa soli za odmrzavanje i otpornost na habanje. Sve mješavine lijevanog betone s PDB-om zadovoljile su većinu propisanih kriterija za dane razrede, osim mješavine M1 (PDB1), pri čemu je potrebno obratiti pozornost na kemijski sastav i fizikalne



karakteristike PDB-a. Upotrebom PDB-a u betonu kao djelomične zamjene sitnog agregata (pijesku) utječe se na ekološki prihvatljiviju proizvodnju betona kojim se smanjuje prekomjerna emisija stakleničkih plinova, iscrpljivanje prirodnih resursa i potrošnja energije. S druge strane, pomaže se u rješavanju problema upravljanja PDB-om te smanjenja s time povezanih troškova.

## Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u okviru projekta “Razvoj inovativnih građevnih proizvoda primjenom biopepela” KK.01.2.1.01.0049 koji financira Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta temeljem “Ugovora o dodjeli bespovratnih sredstava za projekte koji se financiraju iz europskih strukturnih i investicijskih fondova u financijskom razdoblju 2014. – 2020.”

## Literatura

- [1] Europska komisija: Komunikacija komisije Europskom parlamentu, Europskom Vijeću, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija, Bruxelles, 2019.
- [2] Europski parlament i Vijeće: Direktiva (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora, Službeni list Europske Unije, L 328, Bruxelles, 2018.
- [3] Europska komisija, Zajednički istraživački centar: Brief on biomass for energy in the European Union, Publikacije EU-a, 2019.
- [4] Agrela, F., Cabrera, M., Morales, M. M., Zamorano, M., Alshaaer, M.: Biomass fly ash and biomass bottom ash, *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. pp. 23–58, 2018.
- [5] Pettersson, M., Bjornsson, L., Borjesson, P. Recycling of ash from co-incineration of waste wood and forest fuels: An overlooked challenge in a circular bioenergy system, *Biomass and Bioenergy*, 142, pp. 1-9, 2020.
- [6] Hrvatski operator tržišta energije d.o.o. (HROTE): Povlašteni proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (stanje na dan 30.04.2022.), Zagreb, 2022.
- [7] Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N, Ukrainczyk, N.: Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials, *J. Clean. Prod.*, vol. 229, pp. 1045–1064, 2019.
- [8] Bjegović D., Štirmer, N.: Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.

- [9] United Nations Environment Programme (UNEP): Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance and global sand resources, Geneva, Switzerland, 2019.
- [10] Cheah C. B., Ramli, M.: The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, pp. 669–658, 2011.
- [11] Udoeyo, F. F., Inyang, H., Young, D. T., Oparadu, E. E.: Potential of wood waste ash as an additive in concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol 18, br. 4, pp. 605–611, 2006.
- [12] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12620:2008 Agregati za beton (EN 12620:2002+A1:2008), 2008.
- [13] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1744-1:2012 Ispitivanja kemijskih svojstava agregata - 1. dio: Kemijska analiza (EN 1744-1:2009+A1:2012), 2012.
- [14] Carević, I., Baričević, A., Štirmer, N., Šantek Bajto, J.: Correlation between physical and chemical properties of wood biomass ash and cement composites performances, *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, 2020.
- [15] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1097 - 5: 2008 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata -- 5. dio: Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilirajućem sušioniku (EN 1097-5:2008), 2008.
- [16] Ukrainczyk, N., Vrbos, N.: Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, vol. 30, br. 2, pp. 137-148, 2016.
- [17] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1097-6:2013 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata -- 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode (EN 1097-6:2000+AC:2002), 2013.
- [18] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 2: 2019 Ispitivanje svježega betona - 2. dio: Ispitivanje slijeganjem (EN 12350-2:2019), 2019.
- [19] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 6: 2019, Ispitivanje svježega betona - 6. dio: Gustoća (EN 12350-6:2019), 2019.
- [20] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 7: 2019 Ispitivanje svježega betona - 7. dio: Sadržaj pora - Tlačne metode (EN 12350-7:2019), 2019.
- [21] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 1: 2019, Ispitivanje svježega betona - 1. dio: Uzorkovanje i uobičajena oprema (EN 12350-1:2019), 2019.
- [22] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350-5 Ispitivanje svježega betona - 5. dio: Ispitivanje rasprostiranjem (EN 12350-5:2009), 2009.
- [23] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1340:2003, Betonski rubnjaci - Zahtjevi i ispitne metode (EN 1340:2003), 2004.

- [24] Rissanen, J., Ohenoja, K., Kinnunen, P., Romagnoli, M., Illikainen, M.: Milling of peat-wood fly ash: Effect on water demand of mortar and rheology of cement paste, *Constr. Build. Mater.*, vol. 180, pp. 143–153, 2018.
- [25] Lessard, J.-M., Omran, A. F., Tagnit-Hamou, A., Gagne, R.: Feasibility of Using Biomass Fly and Bottom Ashes to Produce RCC and PCC, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, br. 4, 2016.
- [26] Beltrán, M. G. Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J., Ramírez, A.: Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates, *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 231–238, 2014.
- [27] Medina, J. M., Sáez del Bosque, I. F., Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I., Medina, C.: Durability of new blended cements additioned with recycled biomass bottom ASH from electric power plants, *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 429–440, 2019.
- [28] Wang, S., Llamazos, E., Baxter, L., Fonseca, F.: Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests, *Fuel*, vol. 87, br. 3, pp. 359–364, 2008.
- [29] Wang S., Baxter, L.: Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability, *Fuel Process. Technol.*, vol. 88, pp. 1165–1170, 2007.

# Freeze-thaw resistance with de-icing salts of alkali-activated slag concrete: the influence of activator type and dosage and comparison to the ordinary Portland cement concrete

Olivera Bukvić<sup>1</sup>, Asst. Prof. Marijana Serdar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, [olivera.bukvic@grad.unizg.hr](mailto:olivera.bukvic@grad.unizg.hr)

<sup>2</sup>University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, [marijana.serdar@grad.unizg.hr](mailto:marijana.serdar@grad.unizg.hr)

## Abstract

This paper presents the results of an experimental study of the freeze-thaw resistance with de-icing salts (resistance to scaling) of three slag-based alkali-activated (AA) concrete mixes and the reference OPC concrete mix. The scaling resistance was tested on the samples subjected to the 7, 14, 28, 42 and 56 freezing and thawing cycles with 3% NaCl solution as freezing medium. The results showed that the increased sodium silicate content enhances the scaling resistance of the AA concrete. OPC concrete exhibited much higher scaling resistance up to 42 cycles, after which it showed severe damage, while the scaling of AA concrete mixes became more moderate after 7 cycles of testing.

*Key words: freeze-thaw resistance, scaling, alkali - activated materials, slag, durability*

## Otpornost alkalno-aktiviranog betona na bazi zgre na smrzavanje i odmrzavanje sa solima za odmrzavanje: utjecaj vrste i količine aktivatora i usporedba s betonom na bazi običnog portlandskog cementa

### Sažetak

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja otpornosti tri mješavine alkalno-aktiviranog (AA) betona na bazi zgre i referentne betonske mješavine s običnim portlandskim cementom (OPC), na smrzavanje i odmrzavanje sa solima za odmrzavanje (otpornost na ljuštenje). Otpornost na ljuštenje ispitana je na uzorcima izloženim 7, 14, 28, 42 i 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja s 3 %-tnom otopinom NaCl kao medijem za smrzavanje. Rezultati su pokazali da povećani sadržaj natrijeva silikata povećava otpornost na ljuštenje AA betona. OPC beton pokazao je mnogo veću otpornost na ljuštenje do 42 ciklusa, nakon čega su primijećena ozbiljna oštećenja, dok je ljuštenje AA betona postalo umjereno nakon 7 ciklusa ispitivanja.

*Ključne riječi: otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, ljuštenje, alkalno-aktivirani materijali, zgura, trajnost*

## 1 Introduction

The need for sustainable construction sets the requirements for developing alternative binders to cement, since the production of cement clinker is responsible for 8% of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions [1]. Thus, the partial or complete cement replacement in concrete mixes by alternative binders became the central point in the research area of cementitious materials. One type of alternative binders that gains a lot of research attention are alkali-activated materials (AAMs): a cement-free binders, based on aluminosilicate rich powder precursors activated by alkaline solutions. Waste materials and industrial by-products such as slag, fly ash or metakaolin can be used as precursors, while alkaline hydroxides, silicates, carbonates and sulphates are used as activators, separately or combined [2].

The potential benefits of AAMs application are not only in the reducing the CO<sub>2</sub> emissions, but also in reducing the exploitation of natural resources as raw materials and utilization of waste materials in significant amount, compared to partial replacement of OPC in traditional concrete [2, 3].

The AAMs can be designed to have comparable properties to ordinary Portland cement (OPC) concrete but the durability of AAMs is hard to predict, since their properties depend on the chemical composition of the precursors and activators, which differs among the different types of materials used [4]. Even though there are examples of structural application of AAMs [5], there are no standardized testing methods for evaluation of the AAMs long-term performance [2, 5]. Hence, there is still a need for extensive research to reliably assess the long-term performance of AAMs.

One of the most important durability properties for concrete in cold regions is resistance to freezing and thawing. There are two types of damages caused by frost action: the internal structure damage and scaling of the concrete when de-icing salts are used, described as peeling of the concrete surface [6]. The deterioration mechanism of freeze-thaw action is a combination of several processes. When frozen, the volume of water in pore structure increases by approximately 9%. The volume expansion of the ice causes an increase in hydraulic pressure, forcing unfrozen water away. If the free space in the capillary pores is insufficient for water to be displaced from freezing front, the restrained expansion of the ice will induce additional tensile stresses due to the unrelieved hydraulic pressure. This will induce local cracking of the concrete [6, 7].

In addition to the volumetric changes of the ice, the hydraulic pressure may be enhanced by the ice growth due to unbalanced thermodynamic conditions between gel water and ice, i.e., diffusion of gel water into the capillary pores, and osmotic pressure gradients [7, 8]. The pore solution in concrete is not a pure water but a solution of various chlorides, alkalis and sodium hydroxide, especially when de-ic-

ing salts are used [6]. The freezing point of the pore solution is lower than the freezing point of pure water (i.e., lower than 0°C). Additionally, the size of the pores determines the freezing temperature of the pore solution. The smaller the pores, the lower the freezing point of the pore solution. The water in gel pores in concrete with a diameter of about 2 nm, practically never freezes. Most of the ice will form in capillary pores, with diameter in the range 0.01 – 1 µm [6–8]. Since the water in the pores freezes at different temperatures, not all water in concrete pores freezes at the same time [6–8]. The differences in the salt concentration of the pore solution will cause unfrozen water in the gel pores to migrate from the gel into the capillary pores, where it can freeze and form additional ice that will expand [9]. In [2] it is observed that the freeze-thaw resistance is mainly determined by physical and mechanical processes and thus, the same deterioration mechanisms can be expected in AAMs as in OPC concrete. Therefore, water to binder ratio, pore size and structure and degree of saturation will govern these mechanisms. It is reported that concretes with saturation below 80-90% are resistant to frost action, even without air-entraining agents [7]. Lower water to binder ratio ensures less free water that can be frozen in concrete and decrease the amount of capillary pores in concrete, which is favourable for permeability, freeze-thaw resistance and strength [8]. Favourable pore structure can also be attained by creating air-voids as additional space for the ice expansion with air-entraining agents. [8, 10].

The resistance to scaling is of great interest for the durability of the structure elements treated with de-icing salts due to freezing and thawing exposure. This property is evaluated by simulating the field conditions by subjecting the sample surface to a solution of de-icing salts and exposing samples to repeated freezing and thawing [2, 7, 11]. The resistance to scaling is reported to be generally lower than without de-icing salts, both in OPC concrete and AAMs [2, 6]. However, there is a scarcity in results on scaling of AAMs and the results are not consistent [12]. Apart from the mentioned ones mutual to the OPC concrete, there are additional factors important for the freeze-thaw resistance of the AAMs. The type and amount of precursor plays a major role in the resistance to frost action of the AAMs. It is reported in the literature that the AAMs made with fly-ash are much more susceptible to scaling than made with slag, due to its lower hydration kinetics [5, 8, 13]. Furthermore, the type and dosage of the activator is very important as well. Although sodium hydroxide enhances the kinetics of alkaline activation [14], sodium silicate has been reported as the most reliable activator for obtaining less porous structure and higher frost resistance [5, 8, 10, 15]. The chemistry of alkaline activator will also determine the freezing point of the pore solution [5]. The lower freezing points of the pore solution than in OPC concrete are promising and the reason for this can also be the higher content of gel pores in AA concretes, while OPC systems have more capillary pores [8, 16].

This paper presents a comparative analysis of the freeze-thaw resistance with de-icing salt of slag-based alkali-activated (AA) concrete and reference OPC concrete. The activator dosage differs in all three AA concrete mixes to evaluate its effect on scaling resistance of the AA slag concrete.

## 2 Materials, sample preparation and test methods

### 2.1 Raw materials and mix design

Three AA concrete mixes were made with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as a precursor and a combination of sodium hydroxide and sodium silicate as activators. GGBFS was supplied by Ecocem Benelux. The sodium hydroxide solution was made by dissolving pellets in water and Geosil 34417, produced by Woellner was used as sodium silicate solution. The chemical composition of GGBFS (Table 1) was obtained by X-ray fluorescence. This analysis was conducted in accordance with ISO/TS 16996:2015 standard [17], by Central laboratory for chemical analysis at HEP, Croatia, using the Rigaku NEX CG instrument and the Rigaku RPF-SQX software, on the samples with particle size 50  $\mu\text{m}$ , in the helium environment.

**Table 1. Chemical composition of GGBFS**

Oxide	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
wt% GGBFS	31.1	13.7	40.9	0.401	0.31	1.26	9.16	0.685	0	2.31

The reference OPC concrete mix was designed in accordance with HRN EN 206 [18] to achieve the requirements for exposure class XF4. CEM I 42.5 R supplied by Holcim, Croatia, and Masterglenium Sky 629 superplasticizer manufactured by Master builders solutions were used to achieve the desired consistency.

Crushed dolomite aggregate with a maximum particle size of 16 mm was used in all mixes. No air entraining agents were used. The detailed mix designs of the concrete mixes are presented in Table 2 and Table 3.

**Table 2. Mix design of AA concrete mixes**

Mix	w/b	GGBFS [kg/m <sup>3</sup> ]	m (NaOH)* [kg/m <sup>3</sup> ]	m (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )* [kg/m <sup>3</sup> ]	Na <sub>2</sub> O wt%** GGBFS	Ms	Additional water [kg/m <sup>3</sup> ]	Fine aggregate [kg/m <sup>3</sup> ]	Coarse aggregate [kg/m <sup>3</sup> ]
S1	0.42	375.0	15	4.46	3.5	0.22	145.04	715.0	1072.0
S2	0.42	375.0	15	10.09	4.1	0.42	140.30	706.0	1058.0
S3	0.42	375.0	6.65	21.10	3.5	1.0	135.87	709.0	1063.0

\*solid; \*\*weight percent of GGBFS

**Table 3. Mix design of OPC concrete mix**

Mix	w/b	Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	Water [kg/m <sup>3</sup> ]	Superplasticizer [kg/m <sup>3</sup> ]	Fine aggregate [kg/m <sup>3</sup> ]	Coarse aggregate [kg/m <sup>3</sup> ]
OPC	0.44	340.0	149.6	4.34	797.0	1177.0

The calculations for mix proportioning were performed for the absolute volume of 1m<sup>3</sup> of concrete. In the AA concrete mixes, the GGBFS content and w/b ratio were kept constant. The w/b ratio represents the ratio of total water to total solids, where the total water is calculated as the sum of additional tapped water and the water in activator solutions. The total solids are the sum of GGBFS and solids in the activators. The starting point for the mix design was the RILEM TC 247-DTA round robin test [12], where the freeze-thaw resistance of slag-based AA concrete was tested, among other properties. The mix S2 had the same amount of GGBFS and the activators as the RILEM mix S3a, while the w/b ratio was higher (i.e., 0.42 in S2 and 0.382 in RILEM mix). In the mixes S1 and S3, the amount of activators was varied in order to investigate their effect on freeze-thaw resistance of AA slag concrete. In Table 2, the Na<sub>2</sub>O content (i.e., the alkali content) was calculated as the sum of the alkalis in sodium hydroxide and sodium silicate. The silica modulus (Ms) is calculated as the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio, where the SiO<sub>2</sub> is the amount of silica in sodium silicate.

## 2.2 Sample casting and curing

Four 150 mm cubes were casted for each mix, for the freeze-thaw cycling. Samples were demolded after 24 hours. The OPC concrete samples were cured for 7 days in water. Later, samples were kept in the curing chamber until 21 days old, when the sample preparation for freeze-thaw test begun. Due to their sensitivity to water curing [2], AA concrete samples were cured sealed with polymeric films to prevent the moisture loss, for 21 days. 150 mm cube OPC samples for compressive strength tests were cured for 28 days in humidity chamber in accordance with HRN EN 12390-3 [19]. AA concrete samples were cured sealed, as described.

## 2.3 Test methods

Testing of freeze-thaw resistance with de-icing salts was conducted in accordance with the “slab test” procedure, prescribed in the standard HRN EN 12390-9 [20]. When the samples were 21 days old, 50 mm thick slab specimen were sawn from the 150 mm cubes, for each mix. After that, the slabs were placed in rubber sheets and prepared for the testing, as described in HRN EN 12390-9. The 3 days long pre-saturation of the samples’ surface was conducted when the concrete was 25 days old, by pouring 3mm deep layer of de-ionized water. The NaCl water solution was prepared with NaCl concentration of 3% by mass and poured in 3 mm deep



layer on the top surface of samples, when they were 31 days old. Samples were then placed in the freezing chamber and subjected to repeated freezing and thawing cycles. One cycle of freezing and thawing was 24 hours long. The samples were examined after 7, 14, 28, 42 and 56 cycles. The test surface was rinsed with water and brushed with brush to collect the scaled concrete into the vessel. After each examination, the NaCl solution was poured again for the next set of freeze-thaw cycles. Scaled material was collected in vessel and dried to the constant mass at 110°C. After measuring the dried mass of scaled material, the results are expressed as cumulative mass after defined number of cycles [20].

Prior to the sample casting, fresh properties of the concrete mixes were tested, i.e., consistency, density and air content, as described in HRN EN 12350-2 [21], HRN EN 12350-6 [22] and HRN EN 12350-7 [23], respectively.

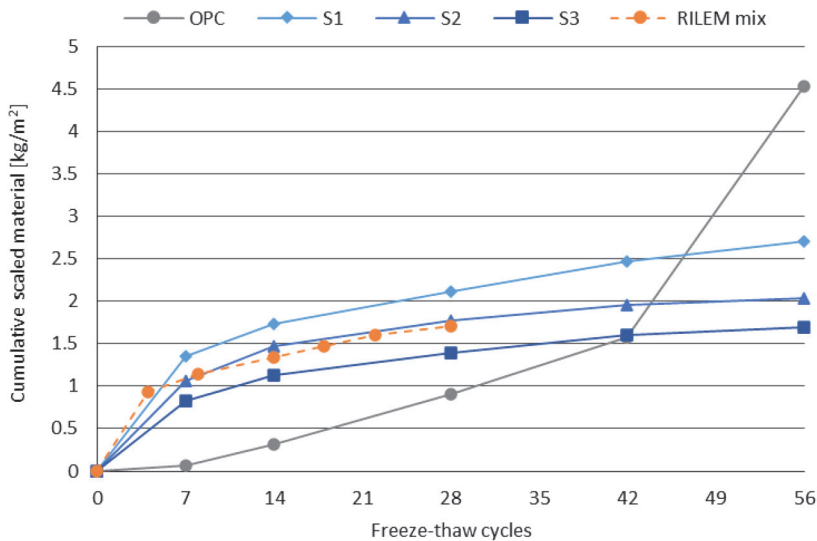
Compressive strength tests were conducted after 28 days of casting, in accordance with HRN EN 12390-3 [19].

### 3 Results and discussion

The results of control testing of fresh state properties and compressive strength of the samples are presented in Table 4. The results of measured scaled mass for AA concrete and OPC concrete mixes after freeze-thaw cycles are shown in Figure 1. The results from RILEM TC 247-DTA round robin test on freeze-thaw resistance with de-icing salts of slag-based AA concrete are plotted on the graph as well. The test method applied in RILEM round robin test is different only in the number of cycles after which the measurements were conducted.

**Table 4. Fresh state properties and compressive strength of S1, S2, S3 and OPC mixes**

Mix	Slump [mm]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Air content [%]	Compressive strength [MPa]
S1	25.0	2474.5	2.2	49.35
S2	54.0	2464.7	1.2	53.76
S3	73.0	2470.9	1.3	70.45
OPC	67.0	2534.6	1.8	70.39



**Figure 1. Cumulative scaled material for S1, S2 and S3 mixes after 7, 14, 28, 42 and 56 cycles and after 4, 8, 14, 18, 22 and 28 cycles for RILEM mix [12]**

When comparing AA concrete mixes, sodium silicate content had the predominant effect on resistance to scaling, which is in line with the results in the literature [5,8,15]. The mix S1 had the lowest amount of sodium silicate and the highest cumulative scaled mass after each measurement. Mix S3 had the highest sodium silicate content and the highest resistance to scaling. Additionally, after 28 cycles, mixes S2 and S3 had a very small increase in scaled material. The mix S2 showed almost the same results as the corresponding RILEM mix. It can be concluded that the small increase in w/b ratio for mix S2 compared to RILEM mix had almost no effect on the freeze-thaw resistance. The increase in sodium silicate content in the mixes resulted in the formation of denser binder matrix and higher compressive strength, leading to the highest resistance to scaling of the mix S3, followed by S2, followed by the mix S1 [10, 15].

Up to the 42<sup>nd</sup> cycle, all three AA concrete mixes exhibited much lower resistance to scaling than OPC concrete. However, after 7 cycles, the increase in scaled material for AA concrete became moderate, which can be seen in reduction of steepness of the cumulative curves (Figure 1), while the OPC concrete exhibited steep increase in scaled material. After 42 cycles, the mix S3 and OPC mix showed the same freeze-thaw performance. After 56 cycles, OPC mix had much more severe damages compared to all three AA concrete mixes, with 4.53 kg/m<sup>2</sup> of cumulative scaled material. Figure 2 shows the samples after 56 testing cycles. The scaling process of all three AA mixes and OPC mix was followed by falling out of aggregate particles which was

less prominent for AA concrete and increased for OPC concrete with increasing the number of test cycles. The aggregate particles can be seen above the AA concrete samples surfaces due to scaling of the binder (Figure 2), but the samples kept their integrity throughout the whole test period. The mix S1 (Figure 2-A) had deeper damages at the edges of the sample. Although there are parts of the samples with no scaling, OPC samples showed cracking and severe damage of the binder and falling out of the aggregate particles (Figure 2-D).

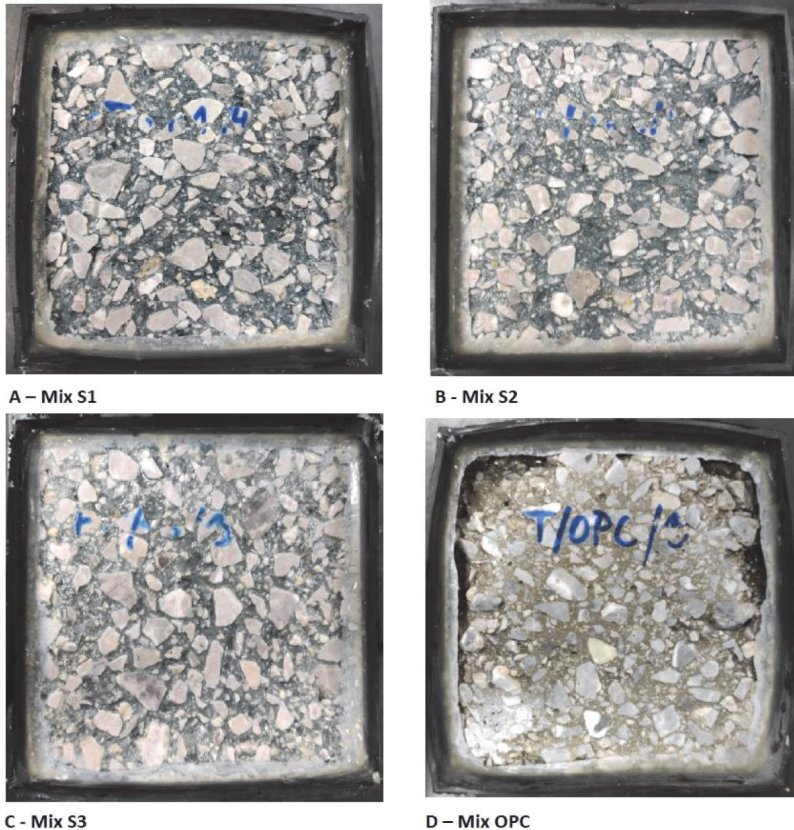


Figure 2. The example of samples exposed to 56 freeze-thaw cycles with de-icing salts: A - S1, B - S2, C - S3, D - OPC

Neither AA concrete or OPC concrete satisfied the durability requirements of XF2 and XF4 exposure classes, which are in Croatian national annex [24] set as 0.5 kg/m<sup>2</sup> of scaled material after 28 cycles and 56 cycles, respectively. Even though AA mixes had much lower resistance to scaling than OPC mix after 7 days of exposure, the fact that scaling of AA mixes became moderate after 7 cycles led them to perform better

after 56 cycles than OPC. Therefore, mitigating the fast scaling of the AA concrete in the first 7 cycles could possibly result in enhanced resistance to freezing and thawing with de-icing salts.

Reasons behind the difference in the behaviour between AAM and OPC during these initial cycles of freezing and thawing still need to be understood. One of the reasons could be carbonation of the initial layer of concrete. Previous research indicates the correlation between the scaling curve and carbonation curve, for the OPC concrete with 50% cement replacement with slag. The decrease of the surface scaling for OPC concrete with partial cement replacement coincided with the carbonation depth occurred during curing [12]. Since the carbonation causes the increase of the capillary pore volume [25], it is possible that the first, carbonated layers of the samples were more susceptible to frost impact than non-carbonated layers. In the case of present study, however, samples were sealed cured, avoiding the possibility to have carbonation in this first layer of concrete. Next reason could be the pre-saturation of the samples. Indeed, the study of Ahani and Nokken [13] on the effect of pre-saturation and curing conditions on the OPC concrete with 35% of the slag indicated that the scaling resistance is higher when the samples are pre-saturated for 7 days with the freezing medium than for non-saturated samples and even from saturated OPC samples. The pre-saturation of the sample surfaces with the NaCl solution could reduce the osmotic pressure caused by the disbalance of ions between the pores of the concrete and NaCl solution [13]. The extended moisture curing was also found to be beneficial for the compressive strength development [3] and therefore scaling resistance of OPC concrete with cement replacement [13] and AA concretes, depending on the type of precursor [12]. The future research will focus on attempt to address these issues in presented mixes and confirm or exclude the possible reasons for low freeze-thaw resistance with de-icing salts of the presented AA concrete mixes, especially in early stage of testing.

## 4 Conclusion

This paper presents the results of the experimental study on the effect of activator type and dosage on freezing and thawing resistance with de-icing salts of alkali activated slag concrete. Three AA concrete mixes with different dosage of sodium hydroxide and sodium silicate were prepared and subjected to the scaling resistance test at 7, 14, 28, 42 and 56 cycles, as well as the reference OPC concrete mix. The comparison between AA concrete mixes showed that increasing the sodium silicate content increased the scaling resistance. The reference OPC mix had significantly higher resistance to freeze-thaw cycling with de-icing salts than AA mixes up to 42 cycles. After the 56th cycle, the OPC concrete exhibited severe damage, i.e., disintegration of the binder and cracking, and finally showed lower resistance to

scaling. An important result of the test is the difference between the shapes of the cumulative scaling curves of the OPC and AA mixes. After a high cumulative mass of scaled material up to 7 cycles, the scaling of AA mixes became moderate, in contrast to the OPC concrete, where it became more evident after each testing cycle. Future studies will investigate the effects of carbonation, saturation, and curing conditions as possible reasons for the rapid scaling after the first 7 cycles. The moderation of the AA concrete scaling over time may be promising regarding its long-term durability. Therefore, mitigating the increased scaling in the early stage of testing could be a solution for improving the freeze-thaw resistance with de-icing salts of the AA concrete.

## Acknowledgement

This research has been conducted as a part of the project DuRSAAM - The PhD Training Network on Durable, Reliable and Sustainable Structures with Alkali-Activated Materials funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 813596. Research is also supported by the project "Alternative Binders for Concrete: understanding microstructure to predict durability, ABC", funded by the Croatian Science Foundation under number UIP-05-2017-4767.

## Literature

- [1] Ramagiri, K.K., Kar, A.: Environmental impact assessment of alkali-activated mortar with waste precursors and activators, *Journal of Building Engineering* 44 (2021) 103391. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103391>.
- [2] Provis, J.L., van Deventer, J.S.J., ed.: *Alkali Activated Materials - State of the Art Report TC 224-AAM*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>.
- [3] Nodehi, M., Taghvaei, V.M.: Alkali-Activated Materials and Geopolymer: a Review of Common Precursors and Activators Addressing Circular Economy, *Circular Economy and Sustainability* 2 (2021), pp. 165-196. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00029-w>.
- [4] Wang, A., et al.: The Durability of Alkali-Activated Materials in Comparison with Ordinary Portland Cements and Concretes: A Review, *Engineering* 6 (2020) 6, pp. 695–706. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.08.019>.
- [5] Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D.: *Alkali Activated Cements and Concretes*. Oxon, UK: Taylor & Francis, 2006.

- [6] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M.: *Concrete: microstructure, properties, and materials*. New York, New York, USA: McGraw-Hill, 2006.
- [7] Neville, A.M., Brooks, J.J.: *Concrete Technology*. Essex, England: Pearson Education Ltd., 2010.
- [8] Cyr, M., Pouhet, R.: The frost resistance of alkali-activated cement-based binders (Chapter 11), *Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes*, (ed. Pacheco Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasirt, P.), Cambridge, UK: Woodhead Publishing; pp. 293-318, 2015.
- [9] Krishnan, A., Mehta, J., Olek, J.: Technical Issues Related to the Use of Fly Ash and Slag During Late-Fall (Low Temperature) Construction Season, *Publication FHWA/IN/JTRP-2005/05. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University*, West Lafayette, Indiana, 2006. <https://doi.org/10.5703/1288284313382>.
- [10] Krstic, M., Davalos, J.F., Rossi, E., Figueiredo, S.C., Copuroglu, O.: Freeze–Thaw Resistance and Air-Void Analysis of Concrete with Recycled Glass–Pozzolan Using X-ray Micro-Tomography, *Materials* 14 (2020) 1, p. 154. <https://doi.org/10.3390/ma14010154>.
- [11] Chen, B., Wang, J.: Experimental Study on the Durability of Alkali-Activated Slag Concrete after Freeze-Thaw Cycle, *Advances in Materials Science and Engineering* (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/9915639>.
- [12] Winnefeld, F., et al.: RILEM TC 247-DTA round robin test: sulfate resistance, alkali-silica reaction and freeze–thaw resistance of alkali-activated concretes, *Materials and Structures* 53 (2020) 6. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01562-0>.
- [13] Ahani, R.M., Nokken, M.R.: Salt scaling resistance – The effect of curing and pre-saturation, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 1, pp. 558–564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.058>.
- [14] Ben Haha, M., Le Saout, G., Winnefeld, F., Lothenbach, B.: Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 3, pp. 301–310. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.016>.
- [15] Fu, Y., Cai, L., Yonggen, W.: Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 7, pp. 3144–3148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.006>.
- [16] Zhang, Z., Wang, H.: Analysing the relation between pore structure and permeability of alkali-activated concrete binders (Chapter 9), *Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes*, (ed. Pacheco Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasirt, P.), Cambridge, UK: Woodhead Publishing; pp. 235-264, 2015.

- [17] ISO/TS 16996:2015 Solid biofuels - Determination of elemental composition by X-ray fluorescence 2015.
- [18] HRN EN 206:2014 - Concrete -- Specification, performance, production and conformity, 2014.
- [19] HRN EN 12390-3:2019 - Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, 2019.
- [20] HRN EN 12390-9:2016 - Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts – Scaling, 2016.
- [21] HRN EN 12350-2:2019 - Testing fresh concrete - Part 2: Slump test, 2019.
- [22] HRN EN 12350-6:2019 - Testing fresh concrete - Part 6: Density, 2019.
- [23] HRN EN 12350-7:2019 - Testing fresh concrete - Part 7: Air content - Pressure methods, 2019.
- [24] HRN 1128: 2007 - Concrete - Guidelines for the implementation of HRN EN 206-1, 2007.
- [25] Shi, Z., Shi, C., Wan, S., Li, N., Zhang, Z.: Effect of alkali dosage and silicate modulus on carbonation of alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Research* 113 (2018), pp. 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.005>.

# Utjecaj optimizacije gustoće pakiranja čestica na smanjenje količine portlandcementsa u betonu

Petra Štefanec<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Ivan Gabrijel<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

Kako bi se smanjila emisija CO<sub>2</sub> i štetan utjecaj na okoliš prilikom proizvodnje betona, važno je promišljati projektiranje betonskih mješavina. U praksi se smanjenje količine cementa ostvaruje primjenom cementa s mineralnim dodacima (punilima) ili rjeđe zamjenom dijela cementa mineralnim dodacima prilikom pripreve betona. Pri tome se ne ulazi u detaljnu karakterizaciju dodataka, kao ni analizu mogućih fizikalnih i kemijskih interakcija između čestica, zbog čega se često ne uspijeva realizirati stvarni potencijal zamjene dijela cementa. Fundamentalni pristup navedenom problemu moguće je ostvariti kroz teoriju pakiranja čestica. U ovom radu prikazane su postojeće metode optimizacije pakiranja čestica, dan je uvid u najvažnije parametre koji definiraju pakiranje čestica, te je naposljetku pregledom literature prikazano na koji se način u novije doba smanjuje količina portlandcementsa u betonskim mješavinama pomoću optimizacije gustoće pakiranja čestica.

*Cljučne riječi: CO<sub>2</sub>, gustoća pakiranja čestica, portlandcement, punilo*

## The influence of particle packing density optimization on the reduction of the amount of Portland cement in concrete

### Abstract

In order to reduce the emission of CO<sub>2</sub> and the harmful impact on the environment during the production of concrete, it is important to think about the design of concrete mixes. In practice, the amount of cement is reduced by using cement with mineral additives (fillers) or, more rarely, by replacing part of the cement with mineral additives during the preparation of concrete. This does not go into the detailed characterization of the additives, nor the analysis of possible physical and chemical interactions between the particles, which is why the real potential of replacing part of the cement is often not realized. A fundamental approach to the mentioned problem can be realized through the theory of particle packing. In this paper, the existing methods of optimizing particle packing are presented, an insight is given into the most important parameters that define particle packing, and finally, a review of the literature shows how the amount of Portland cement in concrete mixes is reduced in recent times by optimizing the density of particle packing.

*Key words: CO<sub>2</sub>, packing density, particle packing, portland cement, filler*



## 1 Uvod

Urbanizacija i porast broja stanovništva koji se očekuju tijekom slijedećih desetljeća, posebice u zemljama u razvoju, učinit će potražnju za cementom i betonom većom no ikada. Smatra se da će se globalna proizvodnja cementa između 2005. i 2050. godine povećati za 2,5 puta [1], a nedavne procjene pokazuju kako već sada uzrokuje oko 7 % ukupnih globalnih emisija CO<sub>2</sub> [2]. Betonske konstrukcije izložene su u svom uporabnom vijeku različitim destruktivnim utjecajima koji djelujući na materijale bitno određuju vijek trajanja objekata, a koji danas iznosi oko 50 godina. No, u praksi često već nakon 20 do 30 godina konstrukcije gube svoja trajnosna svojstva i potrebne su različite, često i vrlo skupe, intervencije kako bi se zadržala zadovoljavajuća uporabna svojstva. Projektiranje betonskih konstrukcija za minimalni vijek trajanja od 100 do 120 godina, kao i gradnja betonom, sa smanjenim udjelom cementa, imalo bi veliki pozitivan utjecaj u ekonomskom i ekološkom pogledu [3]. S obzirom na sigurno povećanje proizvodnje cementa, a znajući kako je za proizvodnju 1 tone portlandcimenta (PC) potrebno približno 1 GJ potrošene energije uz oslobađanje 1 tone CO<sub>2</sub> [4], potrebno je što više promišljati način projektiranja betonskih mješavina.

Strategije za smanjenje emisija CO<sub>2</sub> koje proizlaze iz proizvodnje cementa su: zamjena cementnog klinkera mineralnim dodacima, povećanje energetske učinkovitosti proizvodnog procesa, kao i korištenje alternativnih goriva u postrojenjima [5]. Zamjena određene količine cementnog klinkera u betonu može se postići na različite načine. Najčešće korišten način je optimizacija pakiranja agregata kako bi se minimizirao sadržaj šupljina u betonskoj mješavini. Kroz povijest razvijeni su mnogi modeli koji se mogu koristiti za izračunavanje što povoljnijih gustoća pakiranja čestica, ali većina tih modela u obzir uzima samo agregate i zanemaruje sitnije čestice.

Prema [6-8] dodavanje punila u sastav morta ili betona pokazalo je brojne pozitivne učinke. Prve zabilježene upotrebe punila kao zamjene za udio cementa su bile u dvije američke brane izgrađene početkom 20. st., a koje su i danas u upotrebi što dokazuje dobru trajnost [9]. Budući da ne zahtijevaju kalciniranje, upotreba punila je sve popularnija u projektiranju sastava betona, a tomu doprinosi i raznovrsnost materijala koji se mogu koristiti u tu svrhu. Najčešće se kao punila za beton koriste prahovi vapnenca, kvarca, mramora, recikliranog stakla ili betona, te nusproizvodi od spaljivanja različite biomase. Mineralni dodaci koji imaju čestice manje od čestica cementa također mogu djelovati kao punilo. Za razliku od veziva (cementa), punila su inertni sastojci u sustavu i djeluju na promjenu gustoće pakiranja čestica [10]. Međutim, propisi ograničavaju upotrebu većih količina materijala kao zamjene za cement, zahtijevajući određenu minimalnu količinu cementa u betonu kako bi se osiguralo da svojstva betona kao što su čvrstoća i trajnost budu zadovoljavajuća. Korištenjem tehnika optimizacije pakiranja čestica koje se danas koriste u proizvod-

nji betona, moguće je smanjiti količinu portlandcementsa u betonu bez negativne promjene njegovih svojstava [11]. Na ovaj način uspješno se može projektirati i sastav betona s niskim udjelom cementa. U ovoj vrsti betona vodocementni omjer je vrlo važan čimbenik jer čak i malo veća potreba mješavine za vodom može dovesti do smanjenja čvrstoće i trajnosti konačnog proizvoda. Zato je važno koristiti odgovarajuću metodu projektiranja koja može kontrolirati potrebu betona za vodom, a pri tome zadržati i ciljanu obradljivost u svježem stanju [12].

U ovom radu navode se postojeće metode optimizacije pakiranja čestica, dan je uvid u najvažnije parametre pomoću koji se optimizira raspodjela veličina čestica i koji direktno utječu na gustoću pakiranja čestica. Naposljetku, pregledom literature prikazano na koji način se u novije doba smanjuje količina portlandcementsa u betonskim mješavinama pomoću optimizacije gustoće pakiranja čestica.

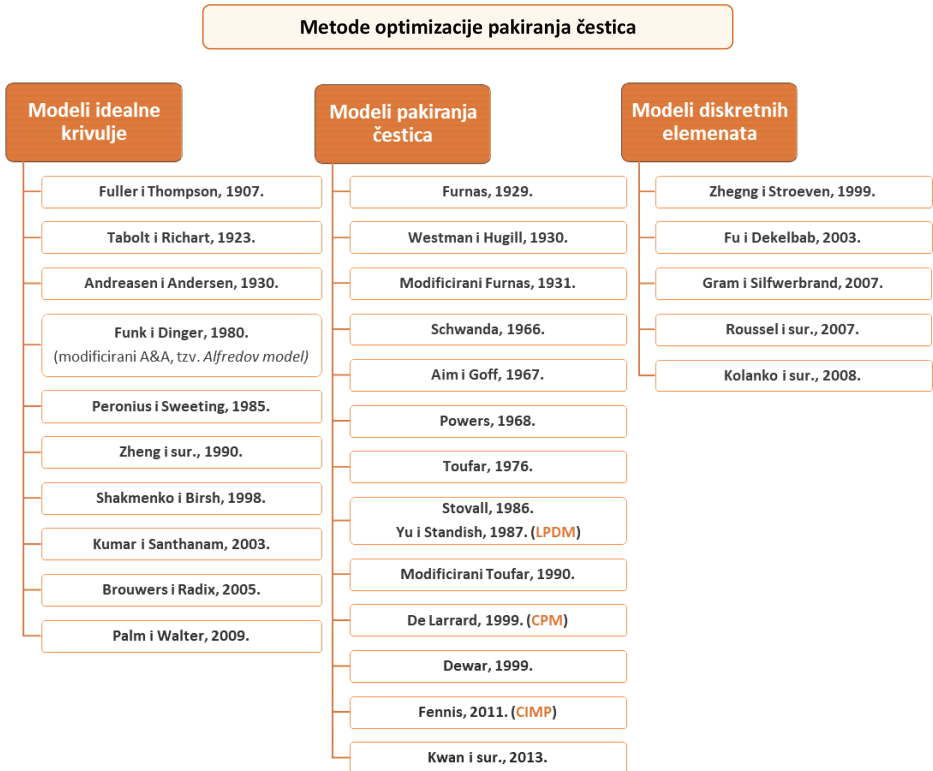
## 2 Metode optimizacije pakiranja čestica

Postoji mnogo različitih pristupa za optimizaciju pakiranja čestica uključujući empirijske metode, teorijske modele i eksperimentalne pristupe. Koncept pakiranja čestica agregata spominje se već u 19. st. kada je Féret objavio prvu studiju u kojoj navodi da izbor agregata utječe na konačnu čvrstoću betona.

Metode optimizacije pakiranja čestica mogu se podijeliti u tri skupine [12]:

- *Modeli idealne krivulje* - skupine čestica sa specifičnom raspodjelom veličina čestica, kombiniraju se na način da ukupna raspodjela veličina čestica smjese bude najbliža idealnoj krivulji.
- *Modeli pakiranja čestica* - analitički modeli pomoću kojih se izračunava ukupna gustoća pakiranja smjese na temelju geometrije kombiniranih skupina čestica.
- *Modeli diskretnih elemenata* - numerički modeli pomoću kojih se generira 'virtuelna' struktura čestica iz zadane raspodjele veličina čestica.

Na slici 1 prikazan je kronološki razvoj različitih metoda optimizacije pakiranja čestica [6, 12, 13, 14].



Slika 1. Shematski prikaz kronološkog razvoja metoda za optimizaciju pakiranja čestica i njihovih modifikacija

### 3 Gustoća pakiranja i strukturni efekti

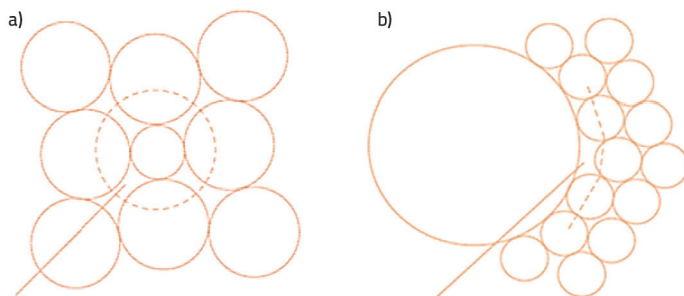
Svrha analitičkih modela pakiranja čestica je izračunati teorijsku gustoću pakiranja čestica u sustavu, a danas su modeli razvijeni dovoljno da se pomoću njih mogu izračunati gustoće pakiranja cijele betonske mješavine na temelju raspodjele veličine čestica i gustoće pakiranja materijala koji se koriste u toj smjesi. *Gustoća pakiranja čestica* u mješavini definira se kao volumen krutih tvari u ukupnom jediničnom volumenu, odnosno opisuje do kojeg stupnja je jedinični volumen ispunjen česticama [12, 15]. Glavni čimbenici koji utječu na gustoću pakiranja sustava su veličina, oblik i volumen čestica, njihova međusobna udaljenost, te geometrijske i elektrostatičke interakcije [5, 16].

*Metodu suhog određivanja gustoće pakiranja* čestica prvi je predložio De Larrard [15] i to za čestice agregata. Stoga, ova metoda ne uzima u obzir vodu prisutnu u mješavini betona, kao niti privlačne sile koje postoje između sitnih čestica prilikom dodavanja punila u mješavinu. Određivanje gustoće pakiranja sitnih čestica meto-

dom suhog pakiranja, bez prisustva vode, može rezultirati određenim problemima. Između čestica punila djeluju kohezivne sile (Van der Waalsove sile) tvoreći male aglomerate čestica. Zbog toga, za primjenu metode suhog određivanja gustoće pakiranja čestica u mješavini kada su prisutna punila, potrebno je koristiti i superplastifikator, kako bi se aglomeracija čestica minimalizirala. Wong i Kwan [17, 18] predložili su metodu mokrog određivanja gustoće pakiranja za proračun pakiranja sitnih praškastih materijala (poput letećih pepela, silicijske prašine i različitih punila). Korištenjem ove metode moguće je izmjeriti utjecaj vode, koristiti iste dodatke za betonsku mješavinu, kao i metode vibriranja i zbijanja koje će se koristiti u proizvodnji betona. To predstavlja stvarne uvjete kojima će sastavni materijali biti podvrgnuti tijekom proizvodnje [19].

Idealna pakiranja ponašaju se tako da se veće šupljine popunjavaju manjim česticama, a šupljine između njih bit će ponovno ispunjene još manjim česticama i itd. [13]. Postoje različiti strukturni efekti koji opisuju raspodjelu položaja čestica različitih veličina i mogu imati pozitivan ili negativan učinak na gustoću pakiranja. Do danas otkriveni i opisani strukturni efekti su: *filling effect*, *occupying effect*, *loosening effect*, *wall effect*, te *wedging effect* [17, 18, 19].

Pomoću *filling effect-a* i *occupying effect-a* dolazi do povećanja gustoće pakiranja kada se u sustav dodaju čestice (punila) čija je srednja veličina manja od srednje veličine čestica cementa. Ovi efekti djeluju na način da se u binarnom sustavu optimizira volumni udio sitnih i/ili krupnih čestica i time se postiže maksimalna moguća gustoća pakiranja čestica. Međutim, povećanje gustoće pakiranja koje uzrokuju ova dva efekta narušiti mogu *loosening effect* i *wall effect*, koji djeluju na sustav tako da smanjuju gustoću pakiranja čestica [17].

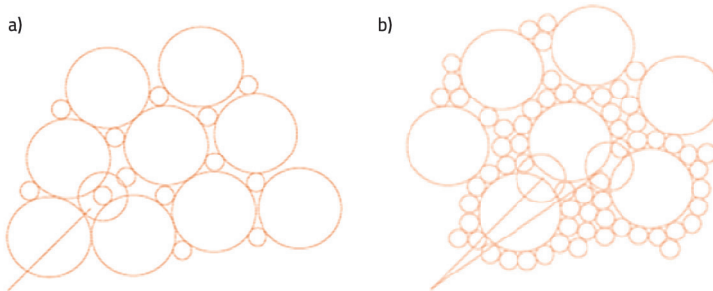


Slika 2. Shematski prikaz: a) *loosening effect*; b) *wall effect* [17]

*Loosening effect* nastaje kada su krupne čestice dominantne, a sitne čestice nisu dovoljno male da stanu u šupljine između krupnih čestica. Tada punjenje šupljina malim česticama "labavi" pakiranje krupnih čestica (slika 2.a). Kada su sitne čestice dominantne nastaje *wall effect*, zato što krupne čestice nisu dovoljno velike. Tada te krupne čestice osim što zauzimaju čvrsti volumen umjesto poroznog volumena

sitnih čestica, stvaraju dodatne šupljine na kontaktnim mjestima krupnih i sitnih čestica (slika 2.b).

Strukturni efekti ovise o omjeru veličine sitnih i krupnih čestica, stoga kada je omjer veličine manji, efekti su slabije izraženi i obrnuto. Ovisnost gustoće pakiranja o volumenskom udjelu sitnih čestica zapravo nije linearna, posebno u točki optimalnog sastava [15, 21]. Zbog toga dolazi do razlike između eksperimentalne i teorijske gustoće pakiranja, a kako bi se ove nepodudarnosti svele na minimum Kwan i sur. predložili su novi strukturni efekt - *wedging effect* [18, 20].



**Slika 3. Shematski prikaz a) *wedging effect* (kada su krupne čestice su dominantne); b) *wedging effect* (kada su sitne čestice su dominantne) [17]**

*Wedging effect* može nastati na dva načina. Kada su krupne čestice dominantne, sitne čestice se mogu "zaglaviti" između njih umjesto da popune šupljine među njima. To rezultira pomicanjem krupnih čestica u sustavu, a time i smanjenjem gustoće pakiranja (slika 3.a). S druge strane, kada su sitne čestice dominantne, a pojedine krupne čestice smještene su iznimno blizu jedna drugoj, to onemogućuje stvaranje potpunih slojeva sitnih čestica između njih. Kao rezultat, pojavljuju se dodatne šupljine između krupnih čestica, odnosno dolazi do prividnog "klinanja" sloja sitnih čestica u kontaktu s krupnim česticama (slika 3.b).

Napredniji modeli pakiranja čestica uzimaju u obzir postojanje strukturnih efekata. U većini modela to su *loosening effect* i *wall effect* čiji se učinak uračunava u obliku *loosening effect parametra* i *wall effect parametra*. Zato se takvi modeli mogu nazvati - modelima s dva parametra.

Modifikacijom ovih modela, znanstvenici su pokušavali unaprijediti shvaćanje modela pakiranja čestica. Tako su Yu i sur. razmatrali učinak oblika čestica i apsolutne veličine čestica na gustoću pakiranja (što je od posebne važnosti kada se u sustav dodaju sitne čestice poput punila koje mogu aglomerirati). Također, de Larrard je modificirao 2-parametarski model Stovalla i sur. i time kreirao najpoznatiji model pakiranja čestica – *model kompresivnog pakiranja* (CPM). On je u svoj model uveo indeks zbivanja, kako bi se u obzir uzeo učinak zbivanja tijekom miješanja i procesa pakiranja na gustoću pakiranja (uvođenjem indeksa zbivanja CPM bi se trebao svr-

stavati u zasebnu klasu modela). Uvođenjem efekta uklinjanja nastao je dodatni parametar i time je razvijen model pakiranja čestica s *tri parametra*. Iako ovaj model još ne uzima u obzir parametre kao što su oblik čestica, apsolutna veličina čestica, učinak zbivanja i pakiranja, njegova modifikacija će biti vrlo korisna za optimizaciju betonske mješavine [17, 18, 20].

#### 4 Istraživanja smanjenja udjela PC optimizacijom gustoće pakiranja čestica

Posljednjih godina povećano je zanimanje za optimizaciju pakiranja čestica u različitim inženjerskim područjima, a u betonskoj industriji naglasak je na smanjenju količine portlandcementsa u betonskim mješavinama. U istraživanjima izdvojenim u ovom poglavlju, ostvareni su zamjetni pomaci u smanjenju količine portlandcementsa i zamjena njegova udjela sa različitim punilima u cementnoj pasti, mortu ili betonu.

Fennis [11] je provela ispitivanje na šesnaest cementnih pasti pripremljenih od portlandcementsa, različitih postotaka silicijske prašine i superplastifikatora. U radu je korišteno projektiranje pomoću CPM, a eksperimentalni rezultati pokazali su kako se gustoća pakiranja čestica može povećati za više od 10 %, kao i da se potreba za vodom može smanjiti dodavanjem punila u sastav cementne paste. Također, istaknuto je kako se cementne paste, mortovi i betoni sa smanjenim udjelom cementa, mogu projektirati samo s punilima koja povećavaju reaktivnost cementa. Fennis [22] je provela ispitivanja na tri betonske mješavine pripremljene od portlandcementsa s dodatkom troske visoke peći, letećeg pepela i silicijske prašine. Kao agregat korišteni su riječni agregati. Prema dobivenim rezultatima optimizacija pakiranja čestica pozitivno je utjecala na svojstva betona kao što su skupljanje i puzanje. Ispitivanja električne otpornosti pokazala su da povećana gustoća pakiranja i smanjena potražnja za vodom dovode do gušće mikrostrukture betona. Ovaj eksperiment pokazao je kako je moguće pažljivim projektiranjem sastava betona uštediti i do 50 % portlandcementsa. Chan [18] je u svom radu procijenio točnost i primjenjivost CPM, 2-parametraskog modela i 3-parametraskog modela. Usporedio je teorijska predviđanja gustoće pakiranja s eksperimentalnim podacima gustoće pakiranja za binarne mješavine. Utvrdio je da kada je omjer veličina sitnih/kрупnih čestica veći od 0,65, sva tri modela pakiranja su dovoljno točna. Međutim, kada je omjer veličine ovih čestica manji od 0,65, 2-parametraski model i CPM podcjenjuju ili precjenjuju gustoću pakiranja. Kao najtočniji pokazao se 3-parametraski model.

Betonske konstrukcije često su izložene agresivnom okolišu kao što je morski okoliš. Castro [13] je u svom radu koristio koncept pakiranja čestica u svrhu projektiranja specijalnih betona. Betonska mješavina koja je uspoređena s referentnom (konvencionalnom) mješavinom, pripravljena je od portlandcementsa, drobljenog kamena

balzatnog podrijetla, prirodnog pijeska i silicijske prašine. Nakon provedenih ispitivanja utvrđeno je kako je koeficijent kapilarnog upijanja vode za novo projektirani beton bio znatno niži od onoga za referentni beton, što ukazuje na iznimno nisku propusnost. Dubina prodiranja kloridnih iona također se smanjila nakon ciklusa vlaženja i sušenja u otopini NaCl-a. Herman [19] je pomoću analitičkog modela pakiranja čestica (CPM) pokušao usporediti teorijsko i eksperimentalno slaganje rezultata za dodavanje određenog udjela silicijske prašine u cementnim pastama. Teorijski rezultati pokazuju kako je moguće koristiti silicijsku prašinu u količinama od 18 do 20 % s obzirom na masu cementa, što je visoko s obzirom na preporuke u literaturi od 15 %. Ipak, ovaj model pakiranja ne uzima u obzir učinak velike specifične površine silicijske prašine na aglomeraciju čestica i potražnju za vodom. Stoga se gustoća pakiranja predviđena pomoću CPM ne može koristiti kao jedini parametar u određivanju optimalne količine silicijske prašine u cementnim pastama.

Juhrat [23] je predstavio praktičnu kombinaciju metoda nazvanu "Mi-S-S" (*mixing-shear-resistance, spread flow, strength test*). Kako bi se smanjila količina cementa, u cementne paste i mortove dodana su *ekopunila* i *mikropunila*. U odnosu na referentne mješavine postignuta je visoka gustoća pakiranja, željena obradljivost, dovoljna tlačna čvrstoća i smanjenje utjecaja na okoliš. Utvrđen je optimalni mogući sadržaj punila od 20 do 40 % s obzirom na masu cementa. Tešić [24] je u svom radu provela istraživanje koristeći Fullеров model, a raspodjela veličina čestica odabrana je pomoću Funka i Dingera. Projektirano je deset betonskih mješavina s različitim udjelima vapnenačkih punila, uz dodatak superplastifikatora i riječnog agregata u 3 različite frakcije. Omjer vode i cementa za svaku mješavinu je bio konstantan, a omjer vode i praha se smanjivao povećanjem zamjene količine cementa. Eksperimentalna ispitivanja provedena su na svježem i očvrslom betonu. Rezultati su pokazali da je moguće povećati tlačnu čvrstoću betona smanjenjem 45 % cementa, no daljnja istraživanja trebaju biti usmjerena na poboljšanje obradljivosti koja se djelomično može nadoknaditi boljim izborom raspodjele veličine čestica agregata.

## 5 Zaključak

Posljednjih desetljeća interes za optimizaciju pakiranja čestica porastao je u području tehnologije betona razvojem novih vrsta betona. Kroz povijest su postavljeni snažni temelji koji su pokazali kako postoji mogućnost poboljšanja betonskih mješavina uređenjem strukture čestica koje su interakciji i time se značajno poboljšava učinkovitost korištenja cementa uz potencijal za smanjenje emisija CO<sub>2</sub>. S češće razmatranog projektiranja pakiranja čestica agregata, istraživanja se danas sve više usmjeravaju na učinkovito projektiranje pakiranja čestica punila. Gustoća pakiranja čestica u betonu je važna jer će manji omjer šupljina između čestica dovesti do smanjene potražnje za vodom. To znači da se u mješavini može koristiti manje cementa

uz zadržavanje konstantnog vodocementnog omjera. Iako je za različite vrste punila dosadašnja praksa ograničavala upotrebu istih u rasponu od 5 do 30 %, korištenjem različitih modela za projektiranje pakiranja čestica, znanstvenici su dokazali kako je moguće, ovisno o vrsti, dodatno povećati količinu punila. Danas je uz pravilno projektirani sastav betonske mješavine s različitim punilima ili nusproizvodima, moguće izbjeći negativne učinke smanjenja količine portlandcimenta i pomoću odabranog modela pakiranja čestica postići ciljanu obradljivost u svježem stanju, čvrstoću u određenoj dobi, maksimalnu gustoću, specificiranu trajnost i stabilnost dimenzija krajnjeg proizvoda. Cilj budućih istraživanja je pomoću najpogodnijeg modela pakiranja čestica, projektirati sastav betona u kojemu će se koristiti lokalno dostupna punila i na taj način proizvesti beton sa smanjenim udjelom cementa, a koji zadovoljava postojeće standarde za građenje u morskom okolišu.

## Literatura

- [1] The cement sustainability initiative (CSI), Cement industry energy and CO<sub>2</sub> performance: getting the numbers right, pp. 44, *CSI report*, 2009.
- [2] Andrew, R.M., Global CO<sub>2</sub> Emissions from Cement Production, *Earth System Science Dana* (2018), 10:195-217
- [3] The Cement Sustainability Initiative, Recycling Concrete. World Business Council for Sustainable Development, *Report*, 2009.
- [4] Mehta, P.K., Reducing the Environmental Impact of Concrete, *Concrete International* 23 (2001) 10, pp. 61-66
- [5] Damineli, B.L., Kemeid, F.M., Aguiar, P.S., John, V.M., Measuring the eco-efficiency of cement use, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010), pp. 555–562
- [6] Vogt, C. Ultrafine particles in concrete, Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design, School of Architecture and the Built Environment, *Doctoral thesis*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2010.
- [7] Ojha, P.N., Mittal, P., Singh, A., Singh, B., Arora, V.V., Optimization and evaluation of ultra high-performance concrete, Technical paper, *Journal of Asian Concrete Federation Vol. 6*, No. 1 (2020), pp. 26-36
- [8] He, H., Courard, L., Particle Packing Density and Limestone Fillers for More Sustainable Cement, *Key Engineering Materials Vol. 517* (2012), pp. 331-337, Switzerland
- [9] Scrivener K.L., Johnb, V.M., Gartner E.M., Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry, *Cement and Concrete Research*, 2018.



- [10] Bjegović, D., Štirmer, N., *Teorija i tehnologija betona*, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Croatia, 2015.
- [11] Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C., den Uijl, J.A., The use of particle packing models to design ecological concrete, *HERON Vol. 54*, No. 2/3 (2009)
- [12] Fennis, S.A.A.M, Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization, *Doctoral thesis*, Delft University of Technology, Netherlands, 2011.
- [13] Castro, A., Ferreira, F., Effect of particle packing in the durability of high-performance concretes, *Revista Ingeniería de Construcción Vol 31*, No. 2 (2016), Department of Civil Engineering, Federal University of São Carlos, Brazil
- [14] Yousufa, S., Sanchezb, L.F.M., Shammeha, S.A., The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry, *Journal of Building Engineering 25* (2019)
- [15] de Larrard, F., *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, E & FN Spon, London, UK, 1999.
- [16] de Grazia, M.T. et al., Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems, *Construction and Building Materials 195* (2019), pp. 524–536
- [17] Wong, V., Chan, K.W., Kwan, A.K.H., Applying Theories of Particle Packing and Rheology to Concrete for Sustainable Development, *Organization, technology and management in construction Vol. 5* (2013), pp. 844-851
- [18] Chan, K.W., Kwan, A.K.H., Evaluation of particle packing models by comparing with published test results, *Particuology* (2014)
- [19] Hermann, A., Langaro, E.A., Lopes da Silva, S.H., Klein, N.S., Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model, *IBRACON Structures and Materials Journal Vol. 9*, No 1 (2016), pp. 48-65
- [20] Koutný, O., Kratochvíl, J., Švec, J., Bednárek, J., Modelling of packing density for particle composites design, *Procedia Engineering 151* (2016), pp. 198–205
- [21] Kwan, A.K.H., Chan, K.W., Wong, V., A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect, *Powder Technol. 237* (2011) 172–179
- [22] Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C., Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design, *HERON Vol. 57*, No. 2 (2012)
- [23] Juhart J. et al., Functional and environmental performance optimization of Portland cement-based materials by combined mineral fillers, *Cement and Concrete Research 122* (2019), pp. 157-178
- [24] Tešić, K., Marinković, S., Savić, A., Influence of cement replacement with limestone filler on the properties of concrete *Building Materials and Structures 64* (2021), pp. 165-170

# Utjecaj autonomnih vozila na odabir projektnih elemenata autocesta

Ana Čudina Ivančev<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Vesna Dragčević<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ana.cudina.ivancev@grad.unizg.hr

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

## Sažetak

Uvođenjem novih tehnologija, poput umjetne inteligencije u automobile, nameće se pitanje kakva bi cestovna infrastruktura trebala biti u budućnosti. Očekuje se da će promjene biti značajne, s obzirom na činjenicu da je do sada ljudski faktor utjecao na brojne parametre u projektiranju. Sposobnost autonomnih vozila da sama upravljaju vozilom, predviđaju situacije, komuniciraju s okolnim vozilima i infrastrukturom te sredinom u kojoj se nalaze, postavlja nove zahtjeve na cestovnu infrastrukturu. Postupne promjene infrastrukture najviše će ovisiti o brzini razvoja autonomnih vozila i njihovog uvođenja u prometni sustav. Počevši od intenzivnog održavanja prometnica i popratnih sadržaja, preko izdvojenih koridora samo za autonomna vozila, dok je konačni cilj pojednostavljena i sigurna cestovna infrastruktura. Cilj ovog rada je dati pregled literature za moguću prilagodbu cestovne infrastrukture namijenjenu prometovanju autonomnih vozila te postaviti temelj za daljnje istraživanje u navedenom području.

*Cljučne riječi: autonomna vozila, cestovna infrastruktura, autocesta, trak za usporenje, projektna brzina, vrijeme preuzimanja*

## The influence of autonomous vehicles on the selection of highway design elements

### Abstract

The introduction of new technologies, such as artificial intelligence in cars, raises the question of what the road infrastructure should be like in the future. The changes are expected to be significant, given that the human factor has influenced a number of design parameters. The ability of autonomous vehicles to drive themselves, anticipate situations, communicate with surrounding vehicles and infrastructure, and the environment in which they are located, places new demands on road infrastructure. Gradual changes in infrastructure will mostly depend on the speed of development of autonomous vehicles and their introduction into the transport system. Starting with intensive maintenance of roads and accompanying facilities, through separate corridors only for autonomous vehicles, while the goal is simplified and safe road infrastructure. The aim of this paper is to provide a review of the literature for the possible adaptation of road infrastructure intended for autonomous vehicles and to lay the foundation for further research in this area.

*Key words: autonomous vehicles, road infrastructure, highway, deceleration lane, design speed, takeover time*

## 1 Uvod

Svakim danom sve je veći broj ljudi koji žive u gradovima. S povećanjem populacije u gradovima povećava se i broj automobila, a samim time zagađenje zraka sve je veće. Već više od 20 godina Europska unija promiče održivi razvoj koji bi trebao omogućiti ravnotežu između zadovoljenja današnjih potreba i mogućnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe [1]. Ciljevi Europske komisije na polju Istraživanja i inovacija kroz Strategiju 2020.-2024. i Okvirni program Obzor Europa 2021. - 2027. su poticanje razvoja zelenih i digitalnih tehnologija u svrhu unaprjeđenja održivijeg i prosperitetnijeg življenja. Unutar navedene Strategije, potiče se i razvoj klimatski neutralnih “pametnih gradova” [2].

Sastavni dio takvih gradova su svakako nove vrste vozila. Zbog elektromotornog pogona autonomna vozila predstavljaju čišći, tiši i energetski učinkovit transportni sustav. Smanjenjem potreba za parkiranjem te suženjem širina voznih trakova, omogućuje se prenamjena vrijednih gradskih prostora. Također, periferija postaje atraktivnija jer će većem broju ljudi biti omogućeno lakše doći do gradova, s tim da će vrijeme provedeno u vožnji moći biti iskorišteno u neku drugu korist [1]. S obzirom na moguće prednosti koje autonomna vozila donose prometnom sustavu, kao što su povećanje sigurnosti vožnje, povećanje mobilnosti za nepokretne, maloljetne i starije osobe, povećanje propusne moći cestovne infrastrukture, već se u znanstvenim krugovima razmatraju mogućnosti promjene cestovne infrastrukture u budućnosti [3].

Očekuje se da će prva autonomna vozila najprije voziti po izvangradskim cestama (autocestama), a tek potom u urbanim sredinama i to u periodu između 2030. i 2050. godine [4]. Na autocestama se, uslijed potrebe za ostvarenjem velikih brzina, primjenjuju veliki polumjeri horizontalnih krivina, blagi uzdužni nagibi nivelete, široki prometni trakovi i slično. Istraživanje [5] fokusirano na utvrđivanje naprednih funkcija autonomnih vozila pokazalo je da strmi uzdužni nagibi i kratke horizontalne krivine mogu uzrokovati pogreške u sustavu te da je na autocestama vožnja takvim vozilima najsigurnija, s obzirom na njezine geometrijske karakteristike. Uz navedeno, pokazalo se da vozilo ne prepoznaje uvijek horizontalnu signalizaciju pa sustav nije u mogućnosti pozicionirati vozilo u sredinu prometnog traka.

Istraživanja [6] predviđaju i da će prva autonomna vozila biti teretna vozila. Autonomna teretna vozila doprinijela bi gospodarstvu smanjenjem troškova rada i goriva, a dostava i doprema bile bi brže nego sada. Ovakva vozila mogla bi voziti u cestovnim vlakovima (tzv. “platooning”) prilikom čega se vozila voze jedno iza drugog na malom prostornom razmaku. Osim toga ne bi bilo vremenskih ograničenja za vožnju koja danas vozači imaju te bi sigurnost vožnje bila veća.

Znanstvena istraživanja sugeriraju uspostavljanje standarada i smjernica za projektiranje, odnosno prilagodbu cestovne infrastrukture novim prometnim trendovima.

Brzim napretkom automobilske industrije ne bi se smjelo dogoditi da cestovna infrastruktura ne bude spremna za uvođenje autonomnih vozila u prometni sustav. Udio autonomnih vozila u prometnom sustavu trebao bi do 2050. godine biti veći od 50% [7], a predviđanja i želje unutar Europske unije sežu čak i da do 2050. godine Europa bude prvi klimatski neutralni kontinent (koji uklanja onoliko emisija CO<sub>2</sub> koliko ih proizvodi) [2].

## 2 Autonomna vozila i utjecaj na cestovnu infrastrukturu

U literaturi [8] se navodi da napredak cestovne infrastrukture mora pratiti razvoj automobilske industrije. Iako će se glavna promjena dogoditi u digitalnoj infrastrukturi, ne treba zanemariti moguće promjene u cestovnoj (fizičkoj) infrastrukturi. Predviđaju se tri faze uvođenja automatiziranih vozila u prometni sustav, a ovisno o razini njihove autonomije i o njihovom udjelu u ukupnom broju vozila na cestama, ovisi i prilagodba cestovne infrastrukture. Počevši od intenzivnog održavanja prometnica i popratnih sadržaja, preko izdvojenih koridora samo za autonomna vozila, dok je konačni cilj pojednostavljena i sigurna cestovna infrastruktura prilagođena prometu autonomnih vozila [7]. Razvoj i prilagodba cestovne infrastrukture ponajviše ovisi o razvoju autonomnih vozila.

Udruženje automobilskih inženjera (SAE) je svrstalo automatizirana vozila u tablicu po razinama autonomije od L0 do L5, gdje razina L0 podrazumijeva konvencionalno vozilo bez automatizacije, a razina L5 potpuno autonomno vozilo [9]. Vozila razine L3 već su proizvedena [10]. S povećanjem razine autonomije, angažman u vožnji prelazi s vozača na vozilo. Klasifikacija je prikazana u tablici 1 [7].

Tablica 1. SAE klasifikacija automatizacije [7]

Br.	Naziv razine	Zadatak vožnje		Odziv na neuspjeh	Operativno područje
		Bočna i uzdužna kontrola	Nadgledanje okoline		
<b>Vozač obavlja dio ili cijeli zadatak vožnje</b>					
0	Bez automatizacije	Vozač	Vozač	Vozač	Nije primjenjivo
1	Vozačevo sudjelovanje	Vozač i sustav	Vozač	Vozač	Ograničeno
2	Djelomična autonomnost	Sustav	Vozač	Vozač	Ograničeno
<b>Sustav obavlja cijeli zadatak vožnje</b>					
3	Uvjetna autonomnost	Sustav	Sustav	Vozač i sustav	Ograničeno
4	Visoka autonomnost	Sustav	Sustav	Sustav	Ograničeno
5	Potpuna autonomnost	Sustav	Sustav	Sustav	Neograničeno

Prilikom projektiranja cestovne infrastrukture potrebno je odrediti mjerodavno vozilo. S obzirom na to da se autonomnim vozilima dodaju senzori te ugrađuju digitalne komponente, nema značajne promjene u veličini i masi vozila [6]. Dosadašnja istraživanja [11, 12] pokazala su da će se parametri za projektiranje cestovne infrastrukture u budućnosti promijeniti zato što su postojeće ceste projektirane prema ljudskim karakteristikama i ograničenjima.

U prethodnim istraživanjima [13], provedenim od strane autora ovog rada analiziran je utjecaj autonomnih vozila na pojedine projektne elemente definirane hrvatskim Pravilnikom [14]. U nastavku su ukratko opisani parametri koji su bili obuhvaćeni navedenom analizom. Vrijeme reakcije je parametar koji utječe na zaustavnu preglednost te bi za autonomna vozila, uslijed smanjenja vremena reakcije, značajno bila smanjena i zaustavna preglednost. Smanjenje zaustavne preglednosti, uz povećanje visine oka vozača/visine senzora autonomnog vozila, utječe na minimalni polumjer konveksne vertikalne krivine. Smanjenim vrijednostima polumjera vertikalnih krivina moguće je bolje prilagoditi cestu terenu i smanjiti troškove izgradnje. Autonomna vozila utjecat će na uvjet za primjenu pravca pri trasiranju. Predviđa se i razlika u poprečnom presjeku ceste uslijed mogućih suženja prometnih trakova. Svakako treba napomenuti da će se nova infrastruktura po ovim pravilima moći projektirati tek kada na cestama budu prometovala isključivo autonomna vozila [15].

S obzirom na sve navedeno, u ovom radu fokus je stavljen na autocestu kao cestu na koju će se autonomna vozila prvo uvesti te mogućoj korekciji pojedinih projektnih elemenata. Optimalno geometrijsko oblikovanje autoceste ovisno je o tome projektira li se nova infrastruktura ili se provodi rekonstrukcija te je dodatno uvjetovano udjelom autonomnih vozila u cjelokupnom prometnom sustavu. Za optimalno oblikovanje bilo kojeg projektnog elementa, odnosno prilagodbe cestovne infrastrukture autonomnim vozilima, nužna je detaljna analiza i sagledavanje svih utjecajnih parametara. U tablici 2 prikazani su projektni elementi autoceste koji bi se s povećanjem udjela autonomnih vozila u prometnom sustavu mogli mijenjati ovisno o tome projektira li se nova infrastruktura ili se provodi rekonstrukcija postojeće.

Pri rekonstrukciji postojeće infrastrukture treba dodatno razmotriti i financijski učinak u odnosu na ekonomičnost korištenja prostora, propusnu moć i sigurnost prometa. Zbog širine teme te ograničenog opsega ovog rada u nastavku je na primjeru traka za usporeenje prikazan postupak istraživanja optimalnog oblikovanja.

Tablica 2. Analiza projektnih elemenata autoceste s obzirom na udio autonomnih vozila

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

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

### 3 Prilagodba duljine trakova za usporenje na autocestama za promet autonomnih vozila

U postojećim istraživanjima [10] sve se češće obrađuje problematika vezana za duljine trakova za usporenje na autocestama jer su to mjesta visokog rizika, s velikim brojem prometnih nesreća. U svrhu poboljšanja sigurnosti, potrebno je odrediti optimalnu duljinu ovih trakova u uvjetima miješanog prometa konvencionalnih vozila i autonomnih vozila različitih razina autonomije.

Izvozi i uvozi na autocestu provode se na čvorištima izvan razine preko spojnih rampi. Loše oblikovani izvozi spojnih rampi uzrokuju smetnje na prolaznom kolniku, a uvozi smanjuju propusnu moć rampe i sigurnost prometa [16]. U prethodnim istraživanjima vezanim za duljinu traka za usporenje, utvrđeno je da kraći trakovi za usporenje uzrokuju promjene u brzinama na prolaznim kolnicima. Dulji trakovi omogućuju ravnomjernu raspodjelu brzina na prolaznim kolnicima i dovoljno vremena za usporenje vozilima koja izlaze [10].

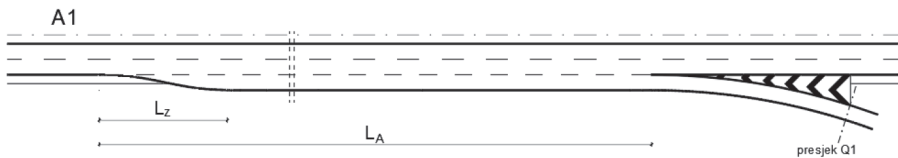
Trenutno u Hrvatskoj ne postoje smjernice za oblikovanje čvorišta izvan razine, odnosno njihovih trakova za usporenje. Iz tog su razloga u ovom radu prikazani i analizirani parametri koji utječu na geometrijsko oblikovanje (duljinu) trakova za usporenje, prema njemačkim smjernicama RAA [17] i švicarskoj normi SN 640 261 [18], a čije bi se vrijednosti u budućnosti (kada se u promet uvedu autonomna vozila) mogle promijeniti.

#### 3.1 Njemačke smjernice

Duljina traka za usporenje  $L_A$  ovisi o projektnoj brzini na prolaznom kolniku  $V_p$  [km/h] i o tipu izlaza A (slika 1). Tipovi izlaza razlikuju se u načinu odvajanja prometnih trakova i broju trakova za usporenje, broju trakova prolaznog kolnika i broju trakova na rampi, kao i u poprečnom presjeku na rampi.

Poprečni presjek na rampi je prethodno uvjetovan prometnim opterećenjem ( $q \leq 1350$  voz/h i  $q > 1350$  voz/h) te duljinom rampe ( $l \leq 500$  m i  $l > 500$  m). Razlikujemo četiri tipa poprečnih presjeka: jednostručna jednosmjerna rampa Q1, dvotračna dvosmjerna rampa Q2, dvotračna jednosmjerna rampa sa zaustavnim trakom Q3 i dvotračna dvosmjerna rampa Q4. Vrijednosti  $L_A$  ovisno o tipu izlaza A kreću se od 100 - 150 m za  $V_p = 80$  km/h te 150 - 250 m za  $V_p = 100 - 130$  km/h. Ukoliko se predviđaju dva traka za usporenje uzima se dvostruka vrijednost  $L_A$ .

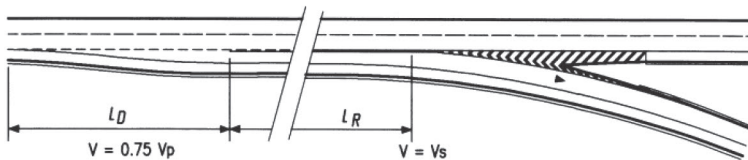
Sastavni dio duljine traka za usporenje  $L_A$  je prijelazni potez  $L_Z$ . Duljina mu je ista za sve tipove izlaza i iznosi 30 m za  $V_p = 80$  km/h te 60 m za  $V_p = 100 - 130$  km/h. Iznimno, ako se odvajaju dva prometna traka s prolaznog kolnika, uzima se dvostruka vrijednost. Ukoliko se odvajaju dva prometna traka na način da se jedan prometni trak dodaje a jedan izuzima s prolaznog kolnika, tada duljina prijelaznog poteza mora iznositi  $\geq 3L_Z$ .



Slika 1. Trak za usporenje prema RAA [17]

### 3.2 Švicarska norma

Prema [18] trak za usporenje sastoji se od prijelaznog poteza  $L_D$  i poteza za usporenje  $L_R$ , a prikazan je na slici 2.



Slika 2. Trak za usporenje prema SN [18]

Prijelazni potez se označava oznakom  $L_D$ , a njegova duljina ovisi o projektnoj brzini na prolaznom kolniku  $V_p$  [km/h] i vrsti prometnice. Na cestama velikog učinka za  $V_p = 80$  km/h duljina  $L_D = 60$  m,  $V_p = 100$  km/h duljina  $L_D = 75$  m, a za  $V_p = 120$  km/h duljina  $L_D = 90$  m.

Potez za usporenje  $L_R$  računa se prema izrazu:

$$L_R = \frac{(0,75 \cdot V_p)^2 - V_s^2}{26 \cdot \left( a \pm \frac{i}{100} \right)} \text{ [m]}$$

gdje je:

- $V_p$  - projektna brzina na prolaznom kolniku [km/h];
- $V_s$  - brzina na kraju poteza za usporenje [km/h];
- $a$  - srednje usporenje [ $m/s^2$ ] za  $i = 0$  % iznosi 1,5 – 2,0  $m/s^2$ ;
- $i$  - uzdužni nagib [%], pozitivan za uspon, negativan za pad.

Za projektne brzine 100 – 120 km/h i uzdužni nagib 0 % te srednje usporenje 1,5  $m/s^2$ , duljina  $L_R$  iznosi 20 – 165 m, ovisno o brzini  $V_s$  [18].

### 3.3 Usporedba parametara danih u njemačkim i švicarskim propisima

Sumarni prikaz parametara koji utječu na ukupnu duljinu traka za usporenje prema njemačkim smjernicama RAA [17] i švicarskoj normi SN 640 261 [18] prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Sumarni prikaz utjecajnih parametara

	Trak za usporenje	
	RAA [17]	SN [18]
Ppoprečni presjek	+	-
$q$ [voz/h]	+	-
$V_p$ [km/h]	+	+
$V_s$ [km/h]	-	+
$i$ [%]	-	+
$a$ [ $m/s^2$ ]	-	+

Iz tablice je jasno da su parametri oblikovanja analiziranih njemačkih smjernica i švicarske norme potpuno različiti, a jedini zajednički parametar pri određivanju duljine traka je projektna brzina na prolaznom kolniku.

### 3.4 Utjecaj autonomnih vozila na duljine trakova za usporenje

Prema njemačkim smjernicama poprečni presjek rampe na čvorištima izvan razine određen je prema prometnom opterećenju i duljini rampe te utječe na odabir tipa traka za usporenje. Poprečni presjek rampe bi mogao doživjeti promjene u budućnosti uslijed mogućnosti autonomnih vozila da ostanu centrirana unutar prometnog traka. Međutim ovakve promjene će biti moguće tek kada na cestama budu prometovala isključivo autonomna vozila [15]. Pretpostavlja se da će utjecaj autonomnih vozila na prometno opterećenje i na propusnu moć biti značajan s obzirom na smanjene razmake između vozila, ravnomjernu raspodjelu brzina vožnje te mogućnost međusobne suradnje putem V2V (“vehicle-to-vehicle“) sustava [19].



Parametri oblikovanja trakova za usporenje poput projektne brzine na prolaznom kolniku i brzine na kraju poteza za usporenje ne bi trebali doživjeti promjene u budućnosti s obzirom na to da će autonomna vozila voziti prema brzini ograničenoj prometnim znakom, odnosno dopuštenu brzinu vožnje na pojedinoj dionici ceste. Uzdužni nagib je parametar koji ovisi o karakteristikama vozila za koja se predviđa da se neće mijenjati [6].

Utjecaj akceleracije, odnosno u slučaju duljine traka za usporenje, utjecaj srednjeg usporenja nešto je o čemu se piše u znanstvenoj literaturi [10]. Pretpostavlja se da će autonomna vozila kontinuirano kočiti bez naglih radnji te da će usporavanje trajati dulje. To znači da će, prema [18] vrijednost parametra "a" biti manja, a duljina poteza za usporenje veća. U korelaciju s usporavanjem se dovodi i razina autonomije vozila. Provedeno je istraživanje [10] s vozačima koji su u simulatoru vožnje na dionicama autoceste vozili autonomna vozila razine L3. Vozila L3 se oslanjaju na čovjeka i na eventualno preuzimanje kontrole prilikom neprepoznavanja okoliša ili nekih nepredviđenih situacija. Jedan od mogućih događaja za koji se predviđa preuzimanje kontrole od strane vozača je pojava traka za usporenje na autocesti i manevar promjene traka. Istraživanje je pokazalo da je vrijeme reakcije za početak usporavanja produljeno zbog potrebe za preuzimanjem kontrole nad vozilom te da bi se zbog sigurnosnih razloga duljine trakova za usporenje trebale povećati. Vrijeme za preuzimanje kontrole promatrano je kroz vremensko ograničenje od 5 s i od 8 s. Temeljem prethodno navedenog, u ovom radu je napravljena analiza mogućeg produljenja traka za usporenje ( $\Delta L$ ) prema do sada dostupnim podacima iz literature. Trenutno jedini dostupni parametar za analizu je vrijeme za preuzimanje kontrole nad vozilom koje se do tog trenutka kretalo u autonomnom načinu. Promatrane su postojeće duljine trakova za usporenje ( $L_u$ ) prema njemačkim i švicarskim propisima, s obzirom na različite projektne brzine na prolaznom kolniku (80 - 120 km/h) uz pretpostavku da se vozilo giba jednoliko. Za analizu je odabran tip izlaza A1 po njemačkim smjernicama RAA i srednje usporenje od  $1,5 \text{ m/s}^2$  te uzdužni nagib od 0% po švicarskoj normi. Prema jednadžbi u nastavku dobiveno je produljenje traka za usporenje ( $\Delta L$ ) s obzirom na događaj preuzimanja koji se odvija na prolaznom traku (slika 3, tablica 4).

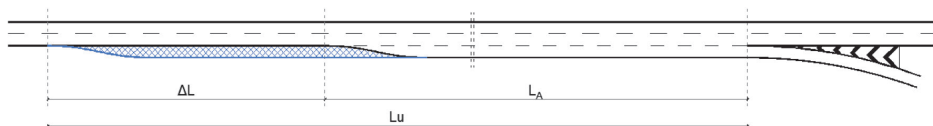
$$\Delta L = \frac{V_p}{3,6} \cdot t \text{ [m]}$$

gdje je:

$\Delta L$  - produljenje traka za usporenje [m];

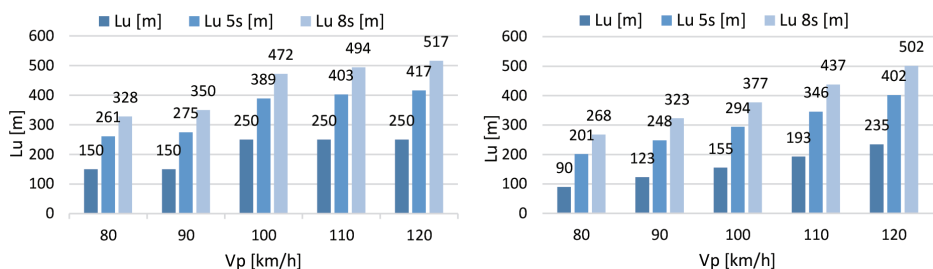
$V_p$  - brzina na prolaznom kolniku [km/h];

$t$  - vrijeme za preuzimanje kontrole nad vozilom [s].


 Slika 3. Prikaz produljenja traka za usporenje  $\Delta L$ 

 Tablica 4. Produljenje traka za usporenje  $\Delta L$  ovisno o vremenu preuzimanja i projektnoj brzini

t [s]	$\Delta L$ [m]				
	80 km/h	90 km/h	100 km/h	110 km/h	120 km/h
5	111	125	139	153	167
8	178	200	222	244	267


 Slika 4. Promjene u duljini traka za usporenje  $L_u$  s obzirom na vrijeme preuzimanja od 5 i 8 s i projektnu brzinu  $V_p$ : a) prema RAA; b) prema SN

Rezultati analize dani su u tablici 3 i na grafovima prikazanim na slici 4. Potrebno produljenje traka za usporenje ( $\Delta L$ ) iznosi od 111 do 167 m za vrijeme preuzimanja od 5 s te od 178 do 267 m za vrijeme od 8 s. Navedeno dovodi do i više nego dvostruko većih duljina trakova za usporenje ( $L_u$ ), koji su prema postojećim njemačkim smjernicama duži nego prema švicarskoj normi. Za kvalitetniju i realniju analizu duljina trakova bilo bi potrebno analizirati nejednoliko gibanje s podacima o srednjem usporenju po različitim presjecima – na prolaznom kolniku, na početku poteza za usporenje i na kraju poteza za usporenje.

## 4 Zaključak

Prilagodba cestovne infrastrukture ovisit će o razvoju autonomnih vozila i njihovom udjelu prometnoj mreži. U ovom radu naglasak je stavljen na autocestu kao cestu na koju će se autonomna vozila prvo uvesti. Analizirani su projektni elementi autoceste za gradnju nove cestovne infrastrukture i za rekonstrukciju postojeće, s obzirom na udio autonomnih vozila u prometnom sustavu. Nova infrastruktura moći će biti građena tek kada na cestama budu prometovala isključivo autonomna vozila, dok

će se u ranijim fazama pri rekonstrukciji postojeće infrastrukture morati razmotriti i financijski učinak u odnosu na ekonomičnost korištenja prostora, propusnu moć i sigurnost prometa. U radu je napravljena analiza jednog projektnog elementa – trakova za usporenje. Analizirane su duljine trakova za usporenje prema njemačkim smjernicama i švicarskoj normi te je prikazana moguća prilagodba za autonomna vozila. Pokazalo se da bi se duljine trakova za usporenje trebale povećati i za više od dvostruke vrijednosti. Za dobivanje optimalne duljine trakova za usporenje trebalo bi analizirati gibanje vozila u presjecima na prolaznom kolniku te na početku i na kraju poteza za usporenje, s obzirom na vrijednost srednjeg usporenja. Također, u svrhu daljnje analize duljine trakova za usporenje trebalo bi u obzir uzeti prostorne razmake između vozila te različite udjele autonomnih i konvencionalnih osobnih, ali i teretnih vozila na autocestama. Sustavnom analizom dostupnih podataka o načinu vožnje i funkcioniranju autonomnih vozila stvara se temelj za promjene u cestovnoj infrastrukturi budućnosti.

## Literatura

- [1] Gavanas N.: Autonomous Road Vehicles: Challenges for Urban Planning in European Cities, *Urban Science*, 3, 61, 2019.
- [2] Strategic Plan 202-2024, [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/rtd\\_sp\\_2020\\_2024\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/rtd_sp_2020_2024_en.pdf)
- [3] Manivasakan, H., Kalra, R., O’Hern, S., Fang, Y., Xi, Y., Zheng, N.: Infrastructure requirement for autonomous vehicle integration for future urban and suburban roads – Current practice and a case study of Melbourne, Australia, *Transportation Research Part A*, 152, 36-53, 2021.
- [4] Fayyaz, M., González- González, E., Nogués, S., Autonomous Mobility: A Potential Opportunity to Reclaim Public Spaces for People, *Sustainability*, 14, 1568, 2022.
- [5] Tak, S., Kim, S., Yu, H., Lee D.: Analysis of Relationship between Road Geometry and Automated Driving Safety for Automated Vehicle-Based Mobility Service, *Sustainability*, 14, 2336, 2022.
- [6] Wang., S., Yu, B., Ma, Y., Liu, J., Zhou, W.: Impacts of Different Driving Automation Levels on Highway Geometric Design from the Perspective of Trucks, *Hindawi, Journal of Advanced Transportation*, Volume 2021, 2021.
- [7] Liu, Y., et al: A Systematic review: Road infrastructure requirement for Connected and Autonomous Vehicles (CAVs), *Journal of Physics: Conference Series* 1187 042073, 2019.
- [8] Rana, M., Hossain, K.: Connected and Autonomous Vehicles and Infrastructures: A Literature Review, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2021.

- [9] SAE International, <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>
- [10] Chen, C., Lin, Z., Zhang, S., Chen, F., Chen, P., Zhang L.: The Compability between the Takeover Process in Conditional Automated Driving and the Current Geometric Design of the Deceleration Lane in Highway, *Sustainability*, 13, 13403, 2021.
- [11] Aryal, P.: Optimization of geometric road design for autonomous vehicle, Degree project, 2020., KTH Royal Institute of technology, Stockholm, Sweden
- [12] Othman, K.: Impact of Autonomous Vehicles on the Physical Infrastructure: Changes and Challenges, *Designs*, 5,40, 2021.
- [13] Čudina Ivančev, A., Dragčević, V., Džambas, T.: Road infrastructure requirements to accommodate autonomous vehicles, 7th International Conference on Road and Rail Infrastructure, Pula, pp. 175-181, 2022.
- [14] Pravilnik o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa (NN 110/2001)
- [15] Guerrieri, M., Mauro, R., Pompigna, A., Isaenko, N.: Road Design Criteria and Capacity Estimation Based on Autonomous Vehicle Performances. First Results from the European C-Roads Platform and A22 Motorway, *Transport and Telecommunication*, volume 22, no.2, 230-243, 2021.
- [16] Klemenčić, A.: Oblikovanje cestovnih čvorišta izvan razine, Građevinski Institut Zagreb, 1982.
- [17] Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), FGSV, 2008.
- [18] Knoten, Kreuzungsfreie Knoten, SN 640 261, Schweizer Norm, 1998.
- [19] Milakis, D., Snelder, M., van Arem, B., van Wee, B., de Almeida Correia, G. H.: Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050, *EJTIR* 17(1), pp. 63-85, 2017.



# Utjecaj klorida iz zraka na trajnost betona u morskom okolišu

Dora Kolman<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Ivan Gabrijel<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

Glavni pokretač korozije armature betona u morskom okolišu je prodiranje klorida u dijelove betona koji su u kontaktu s morskom vodom, no nedovoljna se pozornost pridaje korozivnosti morske atmosfere. Istraživanja pokazuju da postoji velika interakcija između morske atmosfere i betona. Kloridi u zraku definiraju se kao čestice morske vode u zraku koje sadrže kloride, a nastaju razbijanjem valova o prepreku ili su dignute s površine morske vode i nošene vjetrom na veće udaljenosti. Kloridi iz zraka se nakupljaju na površini betona i potencijalno prodiru u isti, doprinoseći tako sadržaju već akumuliranih klorida. Kvantifikacija brzine nakupljanja klorida iz zraka i prodora klorida u beton izložen morskoj atmosferi pruža dodatnu podlogu za planiranje životnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija u morskom okolišu. Ovim je radom dan pregled wet candle metode za određivanje sadržaja klorida u zraku, te su izneseni prijedlozi za daljnja istraživanja u ovom području.

*Ključne riječi: korozija, morska atmosfera, okolišni uvjeti, kloridi iz zraka, wet candle metoda*

## Influence of airborne chlorides on concrete durability in the marine environment

### Abstract

The main driver of corrosion of concrete reinforcement in the marine environment is the penetration of chlorides into the parts of the concrete in contact with seawater, but insufficient attention is paid to the corrosivity of the marine atmosphere. Research shows that there is a large interaction between the marine atmosphere and concrete. Airborne chlorides are defined as chloride-containing seawater particles in the air that are formed by breaking waves against an obstacle or are lifted from the seawater surface and carried by the wind over long distances. Airborne chlorides accumulate on the concrete surface and potentially penetrate into it, thus contributing to the content of already accumulated chlorides. Quantification of the rate of airborne chlorides accumulation and the penetration of chlorides into the concrete exposed to the marine atmosphere provides an additional basis for planning the service life of reinforced concrete structures in the marine environment. This paper presents an overview of the wet candle method for determining the content of airborne chlorides and presents suggestions for further research in this area.

*Key words: corrosion, marine atmosphere, environmental conditions, airborne chlorides, wet candle method*

## 1 Uvod

Od svih razreda okoliša u kojima se beton može naći tijekom uporabnog vijeka, morski okoliš predstavlja jedan od najagresivnijih i najkompleksnijih. Beton je u morskom okolišu izložen djelovanju raznih fizikalno - kemijskih procesa koji uzrokuju njegovu degradaciju, a natrijev klorid koji čini najveći dio otopljenih soli u morskoj vodi, glavni je uzročnik korozije betona.

Istraživanja u morskom okolišu uglavnom su usmjerena na beton permanentno urođen pod vodu ili onaj u zoni plime i oseke te zapljuskivanja valova. No pokazalo se da postoji značajna interakcija betona s okolišem (atmosfera) kada se isti nalazi na manjoj ili većoj udaljenosti od mora [1]. Korozivnost atmosfere, iako često zapostavljena, zadnjih je godina privukla veliku pozornost istraživanja diljem svijeta.

Sposobnost atmosfere da uzrokuje koroziju armature betona ovisi o karakteristikama okoliša i prisutnom onečišćenju. Karakteristike okoliša podrazumijevaju temperaturu, relativnu vlažnost, prisustvo vjetra i padalina, a onečišćenja sulfata i kloride [2]. U slučaju morskog okoliša i njegove atmosfere ističe se onečišćenje kloridima, odnosno prisustvo morskih aerosola (klorida u zraku) koji podrazumijevaju suspenziju kapljica morske vode u zraku. Takve kapljice morske vode sadrže, među ostalim, i kloride, a nastaju razbijanjem valova o svojevrsnu prepreku ili su dignute vjetrom s površine morske vode. Ovisno o njihovoj veličini mogu brzo padati pod utjecajem gravitacije (veće čestice koje nastaju npr. razbijanjem valova o stijenu) ili biti prenesene vjetrom na velike udaljenosti (manje čestice) [3, 4]. Pritom je utjecaj okolišnih uvjeta od velikog značaja, posebice utjecaj vjetra, koji predstavlja glavni način transporta klorida u zraku. Istraživanja su pokazala da je prilikom izraženijih vjetrova sadržaj klorida u zraku značajno porastao, te se isti s prisustvom prepreka i povećanjem udaljenosti od mora smanjio (smanjenje za 85 - 95 % u prvih 500 m udaljenosti od mora) [5-8]. Dodatno, potrebno je uzeti u obzir i efekt ispiranja klorida uslijed padalina. Veća količina vode od kiše ili otopljenog snijega ispiru površinske kloride, a reducira one akumulirane koji uslijed zasićenja betona vodom bivaju istisnuti prema van [3, 8, 9]. Jednako vrijedi i za slučaj visoke relativne vlažnosti, no u slučaju niske relativne vlažnosti i visoke temperature dolazi do isparavanja vode i zaostajanja klorida u betonu. Općenito, s povećanjem temperature ubrzava se tijekom kemijskih reakcija pa tako i proces korozije [3, 10].

Kloridi u zraku jedni su od najznačajnijih prirodnih i antropogenih onečišćivača u atmosferi, posebice u morskom okolišu gdje je njihovo porijeklo primarno prirodno. Imaju veliku ulogu pri procesu korozije, a brojna su istraživanja pokazala da je korozija uslijed djelovanja okolišnih uvjeta jasno povezana sa sadržajem prisutnih klorida u zraku, i to na način da je izraženija s porastom sadržaja klorida u zraku [7, 11]. Određivanjem brzine nakupljanja klorida iz zraka, sukladno normi HRN EN ISO 9225, dobiva se uvid u mogućnost klasifikacije korozivnosti specifičnog područja

prema normi HRN EN ISO 9223, te dodatan sadržaj klorida iz atmosfere (zraka) dostupnih za prodiranje u beton i posljedičan doprinos procesu korozije [1, 5, 11, 12]. Potonje može poslužiti kao okolišni indikator za procjenu i predviđanje vijeka trajanja betonskih konstrukcija u morskom okolišu i sugerirati minimalnu debljinu zaštitnog sloja u betonu, simulacijom krivulje napredovanja praga sadržaja klorida u betonu. Kao prag sadržaja klorida, odnosno kritična vrijednost klorida u betonu nakon koje nastupa korozija, postavljena je vrijednost od 0,4 % klorida po masi cementa (uvjet iz norme HRN EN 206) [13]. Prema istraživanju provedenom na istočnoj obali Brazila, vijek trajanja betonskih konstrukcija može se skratiti između 30 % i 60 % ako se u obzir uzme povećanje brzine nakupljanja klorida iz zraka - promjena sa 120 mg/(m<sup>2</sup>×dan) na 500 mg/(m<sup>2</sup>×dan). Za isto povećanje brzine nakupljanja klorida iz zraka, zaštitni sloj betona može varirati između 21 % i 59 %, uzimajući u obzir vijek trajanja konstrukcija od 50 godina te referentnu debljinu zaštitnog sloja od 30 mm [1].

Meira et al. (2010) predlažu da betonske konstrukcije izložene morskoj atmosferi imaju različite zahtjeve za trajnost obzirom na očekivanu brzinu nakupljanja klorida iz zraka, te daju korelaciju sadržaja klorida u uzorku i sadržaja klorida u zraku:

$$C_{tot} = C_0 + k_d \cdot \sqrt{D_c} \quad (1)$$

gdje je  $C_{tot}$  ukupan sadržaj klorida u uzorku,  $C_0$  početna koncentracija klorida u uzorku prije izlaganja (može biti vrlo mala vrijednost ili se uzima vrijednost 0),  $k_d$  koeficijent koji ovisi o karakteristikama uzorka i okoliša ili predstavlja brzinu nakupljanja klorida iz zraka kao okolišni pokazatelj (dobiva se iz nagiba pravca linearne ovisnosti ukupnog sadržaja klorida u uzorku i kvadratnog korijena ukupnog sadržaja klorida iz zraka),  $D_c$  ukupan sadržaj klorida u zraku [1].

## 2 Metode određivanja brzine nakupljanja klorida iz zraka

Prema normi HRN EN ISO 9225 postoje dvije metode određivanja brzine nakupljanja klorida iz zraka, a to su *dry plate* metoda i *wet candle* metoda. Navedene metode razlikuju se obzirom na vrstu izložene površine za taloženje klorida koja može biti suha ili mokra, te obzirom na njen oblik koji može biti pločast ili cilindričan. Odnos brzina nakupljanja klorida iz zraka dviju metoda može se procijeniti kao  $S_{WC} = 2,4S_{DP}$  ( $S_{WC}/S_{DP}$  predstavlja brzinu nakupljanja klorida iz zraka *wet candle/dry plate* metodom) [2]. Korelacija dobivenih vrijednosti dviju metoda jaka je za godišnje prosječne vrijednosti, no slaba je na mjesečnoj razini uzorkovanja uslijed većih varijacija okolišnih (vremenskih) uvjeta. Međutim, razlika u dobivenim vrijednostima brzina nakupljanja klorida iz zraka je mala u slučaju niskih brzina nakupljanja, a velika kod visokih brzina nakupljanja (*wet candle* metoda daje otprilike dvostruko veće vrijed-



nosti). Obje metode rezultat izražavaju kao brzinu nakupljanja klorida iz zraka, u  $\text{mg}/(\text{m}^2 \times \text{dan})$  - prema jednadžbi 2.

$$S = \frac{m_1 - m_0}{A \cdot t} \quad (2)$$

Gdje je S brzina nakupljanja klorida iz zraka *dry plate* odnosno *wet candle* metodom,  $m_1$  ukupna masa klorida iz zraka u uzorku,  $m_0$  ukupna masa klorida u otopini pripremljenoj za slijepu probu (vrijednost mase je u ovom slučaju jednaka 0), A izložena površina, t vrijeme izlaganja [2].

Princip *wet candle* metode zasniva se na izlaganju mokre tekstilne površine atmosferi. Površina koja mora biti u kontaktu s atmosferom je  $100 \text{ cm}^2$  (duljine otprilike 120 mm). *Wet candle* mjerna postaja je formirana od štapa preko kojeg je namotan dvostruki sloj kirurške gaze, uronjenog u bocu preko gumenog čepa. Boca sadrži otopinu glicerola u koju se dodaje par kapi oktanske kiseline. Ovako izrađena mjerna postaja stavlja se na postolje s pripadajućim krovom kao zaštitom od padalina (slika 1) [2].

*Wet candle* metoda najčešće je korištena metoda određivanja brzine nakupljanja klorida iz zraka [11]. Osjetljivija je na prisustvo natrijeva klorida i može sakupiti veću količinu klorida iz zraka [14, 15]. Mjerna postaja je jednostavne izvedbe te oblika koji omogućava sakupljanje klorida iz zraka iz svih smjerova [6, 16]. Potencijalni nedostaci metode ogledaju se u sakupljanju suhih čestica soli koje možda ne bi taložile na površinu betona, i vertikalnoj površini izlaganja koja nije potpuno reprezentativna [16].



Slika 1. *Wet candle* mjerna postaja [1]

### 3 Određivanje sadržaja klorida u zraku u zoni utjecaja mora u Republici Hrvatskoj

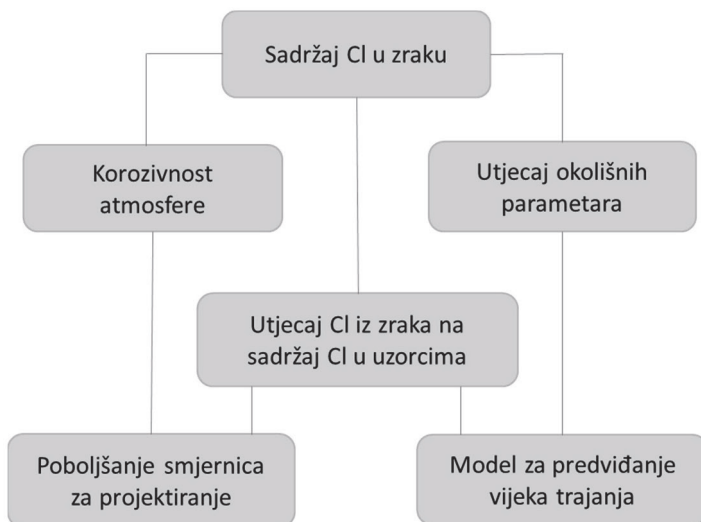
Na području obalne linije Republike Hrvatske postoji velik broj infrastrukturnih objekata izloženih morskoj atmosferi i djelovanju klorida iz zraka. Klasifikacija korozivnosti atmosfere i njene opterećenosti kloridima uvelike ovisi o mikrolokaciji i mikroklimatskim okolišnim uvjetima koji u istoj prevladavaju. Trenutna regulativa ne pruža preporuke za projektiranje objekata obzirom na opterećenost zone morske atmosfere kloridima u zraku, a do danas na području Jadranske obale ne postoje istraživanja provedena u tom smjeru. Stoga se predloženim istraživanjem te planiranim mjerenjima i analizama nastoji omogućiti optimalno građenje armiranobetonskih konstrukcija u zoni utjecaja morske atmosfere.



Slika 2. Lokacije za postavljanje *wet candle* mjernih postaja

*Wet candle* metodom odredit će se brzina nakupljanja klorida iz zraka postavljanjem mjernih postaja na odabrane lokacije triju pomorskih luka, okrenutih prema izvoru klorida (moru) (slika 2). Određivanjem brzine nakupljanja klorida iz zraka klasificirat će se korozivnost atmosfere i ozbiljnost izloženosti betonskih konstrukcija kloridima u zraku na području specifične luke. Dodatno će se analizirati utjecaj parametara mikroklimatskih okolišnih uvjeta (temperatura, relativna vlažnost, vjetar, padaline), dostupnih putem klimatoloških postaja za prizemna meteorološka motrenja, po-

stavljenih u blizini odabranih lokacija. Na istim lokacijama, utjecaju klorida izložit će se uzorci cementnih kompozita izrađenih s različitim vodocementnim omjerima kako bi se uspostavila korelacija poroznosti i brzine nakupljanja klorida u uzorcima. Prikupljenim informacijama dobit će se uvid u mogućnosti poboljšanja smjernica za projektiranje betonskih konstrukcija u morskoj atmosferi, te raditi na razvoju modela za predviđanje vijeka trajanja betonskih konstrukcija izloženih morskoj atmosferi i kloridima iz zraka. Tijek istraživanja shematski je prikazan slikom 3, a obuhvaća eksperimentalno određivanje sadržaja klorida u zraku i različitim uzorcima. Shodno dobivenim rezultatima, provest će se klasifikacija korozivnosti atmosfere, uz prijedloge poboljšanja smjernica za projektiranje armiranobetonskih konstrukcija. Dodatno, odredit će se ocjena utjecaja okolišnih parametara, te u konačnici razviti model za predviđanje vijeka trajanja armiranobetonskih konstrukcija, koji će kao ulazne parametre inkorporirati sadržaj klorida u zraku i uzorcima te okolišne uvjete.



Slika 3. Dijagram tjeka metodologije istraživanja

## 4 Zaključak

Korozivnost atmosfere često je zanemaren parametar pri predviđanju vijeka trajanja armiranobetonskih konstrukcija, obzirom na doprinos koroziji armature betona. Korozija armature betona uzrokovana kloridima sveprisutan je problem u morskom okolišu, stoga je poželjno ispitati korozivnost morske atmosfere koja pritom ima velik utjecaj. Uz okolišne uvjete, velik značaj za korozivnost morske atmosfere ima prisustvo klorida u zraku. Kloridi u zraku podrazumijevaju čestice morske vode koje sadrže kloride, a nastaju razbijanjem valova o prepreku ili su dignute s površine vode

i nošene vjetrom na veće udaljenosti. Ovim se radom predlaže primjena *wet candle* metode u svrhu određivanja brzine nakupljanja klorida iz zraka. Time se dobiva uvid u opcije poboljšanja smjernica za projektiranje armiranobetonskih konstrukcija u morskoj atmosferi, klasifikacijom korozivnosti iste. Analizirat će se utjecaj sadržaja klorida iz zraka na sadržaj klorida u uzorcima cementnih kompozita različitih vodocementnih omjera. Uzimajući u obzir okolišne parametre i sadržaj klorida u zraku, radit će se na razvoju modela za predviđanje vijeka trajanja armiranobetonskih konstrukcija izloženih morskoj atmosferi.

## Literatura

- [1] Meira, G. R., Andrade, C., Alonso, C., Borba Jr., J. C., Padilha Jr., M., Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator, *Cement & Concrete Composites* 32 (2010), pp. 427–435.
- [2] HZN, HRN EN ISO 9225:2012, Korozija metala i legura – Korozivnost atmosfera – Mjerenje parametara okoliša koji utječu na korozivnost atmosfera
- [3] Thompson Shill, S., Chloride penetration into concrete structures exposed to the marine atmosphere, Master Thesis, Florida, 2014.
- [4] Tetsuya, I., Withit, P., Rungrawee, W., Pakpoom, L., Airborne Chloride Intensity and Chloride Ion Penetration into Mortar Specimen in Thailand, *Engineering Journal* Vol. 24 Issue 2 (2020), pp. 87-100.
- [5] Meira, G. R., Andrade, C., Padaratz, I. J., Alonso, C., Borba Jr., J. C., Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete, *Cement & Concrete Composites* 29 (2007), pp. 667–676.
- [6] Duc Phama, N., Kuriyama, Y., Kasai, N., Okazaki, S., Katsuyuki, S., Thao Nguyen, D., A new analysis of wind on chloride deposition for long-term aerosol chloride deposition monitoring with weekly sampling frequency, *Atmospheric Environment* 198 (2019), pp. 46–54.
- [7] Castañeda, A., Corvo, F., Howland, J. J., Pérez, T., Atmospheric Corrosion of Reinforced Concrete Steel in Tropical Coastal Regions, *Engineering Journal* Vol. 17 Issue 2 (2013), pp. 1-18.
- [8] Yu-Sheng, C., Hui-Jen, C., Yi-Wen, C., Yung-Chang, C., Chung-Chia, Y., The correlation between air-borne salt and chlorides cumulated on concrete surface in the marine atmosphere zone in north taiwan, *Journal of Marine Science and Technology* Vol. 21, No. 1 (2013), pp. 24-34.

- [9] Rungrawee, W., Tetsuya, I., Modeling of Chloride Penetration into Concrete under Airborne Chloride Environmental Conditions Combined with Washout Effects, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 15 (2017), pp. 126-142.
- [10] Kumar Mehta, P.: *Concrete in the marine environment*. Essex IG11 8JU, England: Elsevier Science Publishers Ltd., 1991.
- [11] Binyehmed, F. M., Abdullah, A. M., Zainal, Z., Zawawi, R. M., Elawad, R. E., Ben Youssef, K. A., Deposition rate of chloride drc as a corrosive agent in several locations in the Klang Valley, Malaysia, *Science International (Lahore)* 29 (2) (2017), pp. 53-58.
- [12] HZN, HR EN ISO 9223:2012, Korozija metala i legura - Korozivnost atmosfera - Razredba, određivanje i procjena
- [13] HZN, HR EN 206:2021, Beton - Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A2:2021)
- [14] Alcántara, J., de la Fuente, D., Chico, B., Simancas, J., Díaz, I., Morcillo, M., Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel: A Review, *Materials* 10, 406 (2017), pp. 1-67.
- [15] Babutzka, M., Mietz, J., Burkert, A., Investigation of the salinization of steel surfaces in marine environment, *Materials and Corrosion* (2018), pp. 1-10.
- [16] Module Nine of CCE 281 Corrosion: Impact, Principles and Practical Solutions, Module: Measurement of Atmospheric Corrosion Factors, pp. 4

# Analiza ponašanja tradicijskih zidanih zgrada u bloku/nizu prilikom izvedbe zamjenske zgrade po važećim propisima

Maja Mrkonjić<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Josip Atalić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>maya.maric@gmail.com

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

## Sažetak

Tema doktorskog rada vezat će se na analizu ponašanja tradicijskih zgrada pri djelovanju potresa, a koje su izgrađene u bloku/nizu i kod kojih se očekuje međusobna interakcija, jer nemaju seizmičku razdjelnicu. Izvedba suvremene zamjenske zgrade u bloku/nizu po važećim propisima trebala bi imati dostatnu razdjelnicu (dilataciju) kojom bi se spriječila međusobna interakcija zgrada, kako se ne bi negativno utjecalo na ponašanje susjednih zgrada odnosno bloka u cjelini. Zgrade u bloku/nizu izgrađene su da djeluju kao cjelina, a isto ima povoljan utjecaj i pri djelovanju potresa što se pokazalo grubom analizom rezultata preliminarnih pregleda oštećenja i uporabljivosti zgrada nakon zagrebačkog potresa. Istraživački ciljevi rada odnose se na dokazivanje razine oštetljivosti u ovisnosti o rasporedu i redosljedu izgradnje građevina, interakciji susjednih zgrada te razlici u broju i visini etaža susjednih zgrada.

*Ključne riječi: potres, blokovska gradnja, dilatacija, razina oštetljivosti*

## Seismic performance assessment of traditional unreinforced masonry buildings in aggregates: the case of a modern building built in the place of the old one

### Abstract

The topic of the doctoral thesis will be related to the analysis of the seismic behaviour of traditional buildings. According to existing regulations, the construction of a modern replacement building in masonry building aggregates should have a sufficient seismic divider (dilatation) which prevents interaction between the buildings. Masonry building aggregates are built to act as a whole which has a favourable impact in the event of an earthquake, which was shown by analysis of the results of preliminary inspections of damage and usability of buildings after the Zagreb earthquake. The research objectives of the work relate to proving vulnerability levels depending on the layout and order of construction of individual buildings, the interaction of neighbouring buildings and the difference in the number and height of floors of neighbouring buildings within masonry building aggregates.

*Key words: earthquake, masonry building aggregates, dilatation, vulnerability level*

## 1 Uvod

Dana 22. ožujka 2020. godine, glavni grad Hrvatske, Zagreb te njegovu okolicu zadesio je razorni potres magnitude 5,5 i intenziteta VII° prema EMS ljestvici. Potres je posljedično oduzeo život jednoj djevojčici, a mnoge građevine doživjele su značajna oštećenja. Najviše je štete pretrpjelo područje samog epicentra te tradicijski centar Zagreba. Zgrade u epicentru najvećim dijelom pripadaju samostojećim građevinama. S druge strane, centar Zagreba građen je u blokovima, i to u vremenu prije postojanja propisa koji su zahtijevali projektiranje građevina otpornih na potres. Blokovi grada ili zgrade u nizu uobičajeno se sastoje od nizova zgrada koje imaju zajednički nosivi zid (primjer Dubrovnika) ili su im vanjski nosivi zidovi međusobno naslonjeni jedan na drugi (slučaj u Zagrebu). Uobičajeno je da su zgrade u nizu istog konstrukcijskog sustava (iste tipologije) odnosno, izgrađene iz istih materijala, sličnim detaljima spajanja i slično, ali isto tako, svi se ovi parametri mogu i razlikovati. Stoga je važno imati pouzdane ulazne podatke, primjerice o vremenskom razdoblju i načinu izgradnje svih građevina u nizu, svojstvima materijala i slično. Da to jest važno, govore saznanja povezana s posljedicama potresa, rezultati eksperimentalnih ispitivanja te proračuni promatranih nizova. Rezultati su različiti ovisno o tome promatraju li se zgrade unutar niza kao pojedinačne, samostojeće građevine ili su modelirane kao povezane zgrade. U nekim slučajevima ti modeli daju konzervativne rezultate, ali isto tako, mogu navesti na krivi smjer odnosno na krive zaključke i loša inženjerska rješenja. Proces obnove Zagreba uključuje uklanjanje nekih građevina te rekonstrukcije i sanacije drugih. Kako bi se donosile ispravne odluke vezane za uklanjanje i sanaciju jedinica u bloku/nizu, potrebno je ustanoviti zakonitosti ponašanja tih zgrada uslijed horizontalnih opterećenja.

## 2 Blok 19

Potres koji se dogodio 22. ožujka 2020. godine u Zagrebu prouzročio je između ostalog, i štete na zgradama u centru grada. Dodatna im je oštećenja nanio potres koji je 29. prosinca zadesio područje Siska, Petrinje i Gline. Zbog potrebe za sanacijom šteta te konstrukcijskom obnovom svih građevina čija je stabilnost i arhitektura narušena, pokrenut je “Program cjelovite obnove povijesne urbane cjeline Zagreba” [1]. Kao dio tog programa odlučeno je kako će Blok 19, obzirom da je jedan od tipskih i najkvalitetnije građenih gradskih cjelina, biti pilot – projekt. To znači kako će se saznanja dobivena iz istraživanja preslikati i na druge gradske blokove. S druge pak strane, jasno je kako bez obzira na spoznaje istraživanja i primjenu istih na ostale blokove, svaka građevina i svaki blok treba zasebne preglede i pristup za točniju procjenu stanja i odluku o sanaciji. Trenutna saznanja pokazuju kako su osim oštećenja uslijed potresa problem ovoga bloka neodržavanje te nedopušteni (nezakoniti)



zahvati koji su se izvodili. Predmetnim zgradama potrebna je rekonstrukcija zbog oštećenja uslijed potresa, ali, neovisno o oštećenjima, i zbog dotrajalosti i velikog rizika od potresa (izgrađene prije seizmičkih propisa). U doba izgradnje vrijedili su propisi koji danas nisu prihvatljivi, ili ih nije niti bilo te je za očekivati kako će takve građevine biti potrebno konstruktivno učvrstiti.

Blok 19 (slika 1), a koji će biti jedna od tema istraživanja ovoga doktorskog rada, sastoji se od 35 uličnih zgrada u bloku [2]. Građevine su to koje su naručivali istaknuti građani grada Zagreba, a isto tako su ih gradili poznati arhitekti i graditelji toga razdoblja, među kojima je najpoznatiji Hermann Bolle. Time se nameće zaključak kako su zgrade ovoga bloka vrijedna ostavština, što rezultira određenim ograničenjima prilikom rekonstrukcije, u obliku očuvanja izvornog stanja.



Slika 1. Pogled na Blok 19 s jugozapada: ugao Dalmatinske i Medulićeve ulice [2]

## 2.1 Povijest nastanka i smještaj

Za dobivanje cjelovite slike za prvi korak zavirilo se u povijest. Prvi pisani trag o nastanku grada Zagreba datira iz 1094. godine kada kralj Ladislav osniva Zagrebačku biskupiju na Kaptolu. Drugi pak važan događaj zbiva se 1242., a u njemu kralj Bela IV Zlatnom Bulom naselju Gradec dodjeljuje status slobodnoga kraljevskog grada. Kaptol i Gradec smješteni su na brežuljku, a podno njih nalazi se takozvano podgrađe odnosno dio grada izvan gradskih zidina. Godine 1850. donesen je Carski patent



kojim su naselja ujedinjena u Slobodni i kraljevski grad Zagreb [3]. Ovaj je patent od cara Franje Josipa ishodio ban Josip Jelačić, a novonastalo ujedinenje značilo je urbanizaciju Zagreba. Ruše se zidine Gradeca, a podgrađe postaje prostor za širenje i izgradnju grada. Tu se formira Donji grad, područje između Illice i Jurišićeve na sjeveru te željezničke pruge na jugu. Zapadno ga omeđuju Savska i nekadašnja Kolodvorska dok mu je istočna granica Draškovićeve ulica. 1853. godine izrađena je "Agram sammt Umgebung", prva detaljna karta koja je prvi stručno i precizno izrađen grafički prikaz Zagreba [4]. 1857. usvojen je Red građenja za zemaljski glavni grad Zagreb, prvi i najvažniji akt nakon ujedinenja zagrebačkih naselja, koji sadrži temeljne odredbe prostornog planiranja Donjeg grada, a među kojima je i blokova gradnja. Te su odredbe 1865. godine potvrđene prvom Regulatornom osnovom odnosno prvim urbanističkim planom grada Zagreba [5].

Podno brežuljaka na kojima su smješteni Kaptol i Gradec, te zapadno od njih, izgrađen je jedan od prvih blokova u području Donjega grada, a to je Blok 19. Građevine ovoga bloka nastajale su u razdoblju od 1850. do 1950. godine (slika 2).



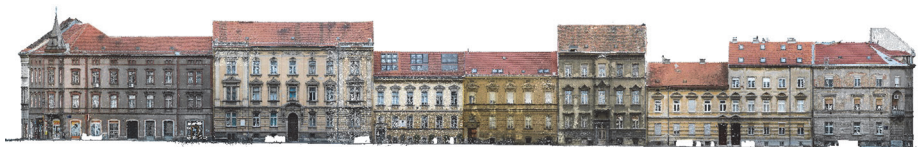
Slika 2. Blok 19: karta vremena gradnje [2]

Parcele su položene u smjeru sjever-jug te su one uz Ilicu i Dalmatinsku ulicu bile duže, dok su parcele uzduž Medulićeve i Frankopanske ulice kraće. U početku je blok zamišljen kao kvadratni dio grada kojemu su kuće, vile i palače izgrađene duž ulica koje ga omeđuju, dok je središnji dio predviđen kao slobodni prostor sa zelenilom i predjelom za šetnju i druženje. Kroz godine se taj središnji prostor ispunjavao prvo građevinama koje su služile kao uredi ili radionice, a kasnije su pretežito vlasnici i stanovnici obodnih kuća, mahom imućni i istaknuti pojedinci i obitelji grada, počeli graditi zgrade za najam. Te su zgrade imale više katova od do tada uobičajene blokovske gradnje, a parcele su bivale sve većeg postotka izgrađenosti [2].

Blok 19 na sjevernom je dijelu omeđen Ilicom, a na južnom Dalmatinskom ulicom. Zapadnu granicu daje mu Medulićeva ulica, dok na istočnoj izlazi na Frankopansku (slike 3 do 6).



Slika 3. Dalmatinska ulica: prikaz pročelja zgrada u nizu Bloka 19 [2]



Slika 4. Medulićeva ulica: prikaz pročelja zgrada u nizu Bloka 19 [2]



Slika 5. Frankopanska ulica: prikaz pročelja zgrada u nizu Bloka 19 [2]



Slika 6. Ilica: prikaz pročelja zgrada u nizu Bloka 19 [2]

Karakteristični presjek kroz Blok 19 predviđen je u smjeru sjever-jug te presijeca unutrašnji prostor spajajući Ilicu na broju 53 s Dalmatinskom ulicom na broju 12 (slika 7).



Slika 7. Poprečni presjek Bloka 19: karakteristični presjek kroz Blok [2]

## 2.2 Građevinski propisi u vrijeme izgradnje

Navedeni su propisi važni za blokovsku gradnju, a koji su doneseni kroz razdoblje izgradnje Bloka 19 [5].

### 1857. Red građenja – Građevinski pravilnik

Građevinskim pravilnikom iz 1857. godine donijete su odluke o izvedbi objekata novogradnje i njihovih pojedinačnih elemenata. To se odnosilo na materijale iz kojih su pojedini elementi izgrađeni, te na njihovo pozicioniranje kako unutar zgrade tako i u odnosu na okolinu. Također je određeno da se nove ulice grade u pravcu, jedne okomito na druge, a trgovi među njima morali su biti pravilnoga oblika. Ovim je Pravilnikom propisan zatvoreni način izgradnje, takozvana blokovska gradnja, iz čega su od 1891. slijedile izrade pojedinačnih planova za određena područja odnosno ulice i trgove.

### 1865. “Predgledni plan razširenja i poliepsanja gradskoga” – Regulacijski plan

Regulacijski plan iz 1865. godine odobrio je većinu odredbi Građevinskog pravilnika iz 1857., a koje su uključivale raspored ulica i trgova. Ono što je dodatno zatraženo bila je izrada nacрта kanalizacije s visinskim kotama. Novina je bilo uvođenje zaštite privatnoga vlasništva.

### 1888. “Regulatorna osnova” – Regulacijski plan

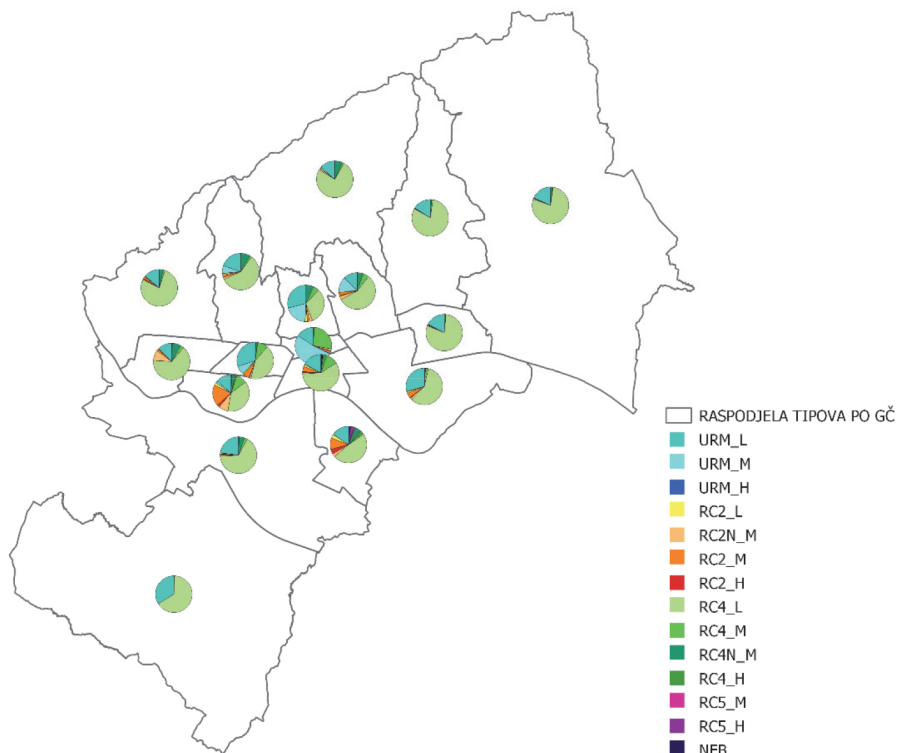
Regulacijski plan usvojen 1888. godine donio je odluku o podjeli grada Zagreba na tri razdjela, a I. razdjel dodatno podijelio na središnji, zapadni i istočni dio. Blok 19 pripada središnjem dijelu I. razdjela. Propisi utvrđeni ovim planom upućivali su na dozvoljene visine novoizgrađenih objekata, veličine parcela i zabrane gradnje, a sve to obzirom na koji se razdjel ili njegov dio gradnja odnosi.

### 1948. Privremeni tehnički propis za opterećenja zgrada [6]

Ovo je propis koji sadrži minimalne uvjete projektiranja izgradnje zgrada otpornih na potres. Sve do 1964. ovaj propis iako vrijedi, nije upotrebljavan od svih sudionika u gradnji stoga ne pretpostavlja da su sve građevine od njegovog donošenja otporne na horizontalne sile uzrokovane potresnim djelovanjem.

## 2.3 Opis građevina i stanje nakon potresa 22. ožujka 2020.

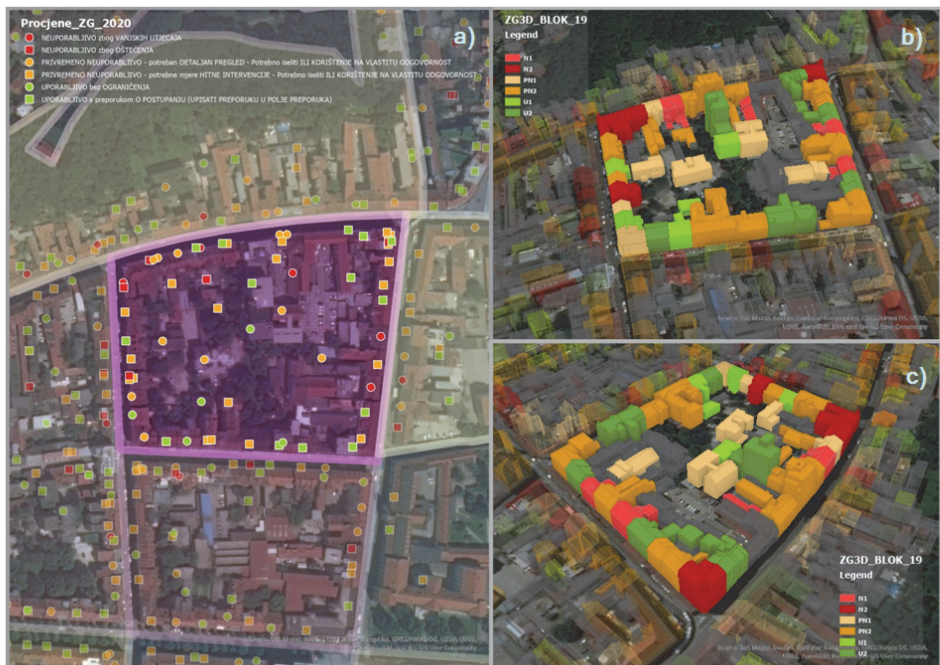
Gruba raspodjela zgrada u Zagrebu, na osnovi istraživanja u Studiji za saniranje posljedica potresa [7] dala je 14 konstrukcijskih sustava (slika 8). URM su zidane zgrade bez serklaža, RC2 zgrade s AB zidovima, RC4 pak zgrade kojima je dominantan konstrukcijski sustav okvir s ispunom i omeđeno žiđe, RC5 su tipske AB zgrade (tzv. limenke), a NEB su AB tornjevi. Također, svakom tipu dodijeljeno je i slovo L, M ili H koje označuje njegovu katnost [8]. Nadalje, dodatnom raspodjelom navedenog broja sustava, došlo se do čak 42 tipa konstrukcijskih sustava.



Slika 8. Raspodjela tipova konstrukcija po gradskim četvrtima [7]

U Bloku 19 najviše su zastupljene građevine tipa URM odnosno zidane zgrade bez serklaža, niže (L) i srednje (M) katnosti. Građene su krajem 19. te početkom 20. stoljeća, kada protupotresna gradnja nije bila zastupljena. Također, kroz vrijeme se zadiralo u njihovu nosivu konstrukciju kroz razne rekonstrukcije koje često nisu slijedile pravila struke, a uzmimo u obzir i to kako materijali nosivih elemenata s vremenom gube mehanička svojstva [1].

Za izvođenje nosive konstrukcije kroz 19. st. koristila se opeka, kamen, mort i drvo, te u manjoj mjeri čelik. Ovdje se bilježi i početak primjene betona, ali tek krajem stoljeća. U 20. stoljeću počinje i uporaba armiranog betona. Zidovi su izvedeni kao neomeđeno ziđe dok su stropni elementi drvene konstrukcije. Stropovi podruma su pak izvedeni kao zidani svodovi. Nakon 1920. godine stropovi se izvode kao (sitno) rebričasti armiranobetonski stropovi. Zgrade koje imaju do dvije etaže pretrpjele su manja oštećenja uslijed potresnog djelovanja u odnosu na zgrade s više katova [6]. Uslijed potresa u Zagrebu 22. ožujka 2020. nastupili su brzi pregledi građevina. Od ukupnog broja prijavljenih građevina s oštećenjem, a koji iznosi 25528 [9], njih 58 (odnosno 41 ukoliko se gleda samo jedan brzi pregled po zgradi) odnosi se na građevine Bloka 19. Navedene procjene spomenutog bloka dale su sljedeće rezultate: za pet zgrada dodijeljen je status N1, za slijedećih pet N2. 11 pak građevina označeno je s PN1, dok ih je 19 označeno s PN2. Oznaku U1 dobile su četiri zgrade, a U2 njih 14.



Slika 9. Blok 19: procjena uporabljivosti zgrada [1]



Nakon 29. prosinca 2020. odnosno potresa kod Petrinje, Blok 19 ponovno je pregledan u opsegu od 8 zgrada, a kojima su nakon brzih pregleda dodijeljene sljedeće oznake: dvije zgrade označene su kao PN2, tri su dobile U2, dodatne dvije U1, a jednoj je dodijeljena oznaka U0.

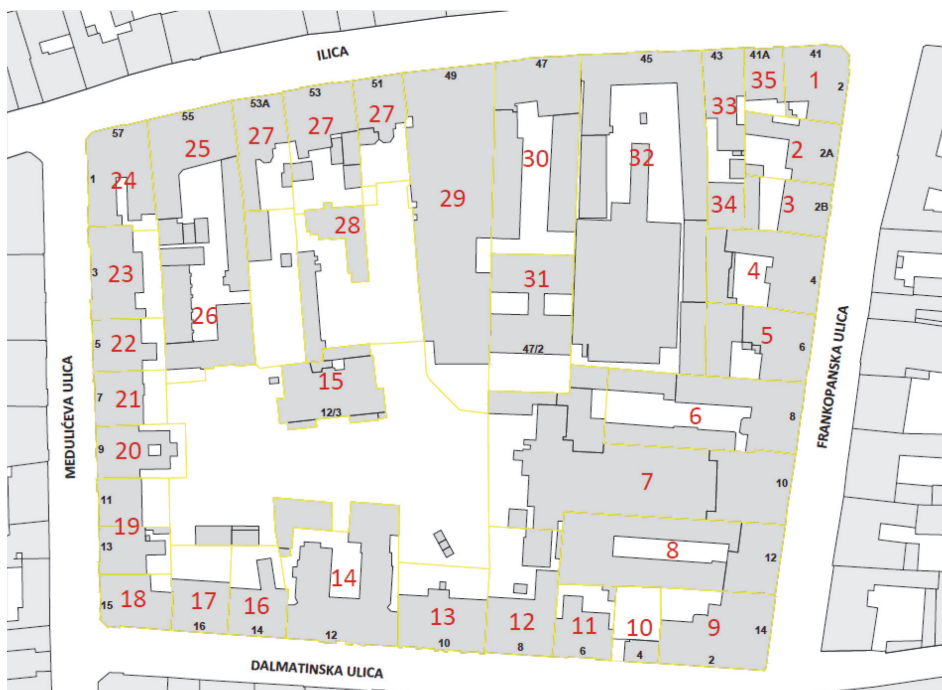
Navedene oznake imaju sljedeća značenja: Bijela oznaka U0 (koja je uvedena nakon potresa kod Petrinje) je uporabljivo bez oštećenja. Zelena oznaka U1 predstavlja uporabljivo bez ograničenja. Zelena oznaka U2 predstavlja uporabljivo s preporukom. Žuta oznaka PN1 je privremeno neuporabljivo uz potreban detaljan pregled. Žuta oznaka PN2 je privremeno neuporabljivo uz potrebne mjere hitne intervencije. Crvena oznaka N1 predstavlja neuporabljivo zbog vanjskog utjecaja. Crvena oznaka N2 je neuporabljivo zbog oštećenja [10].

Nosiva konstrukcija predmetnih zgrada se može smatrati zadovoljavajućom u odnosu na osnovna djelovanja (stalno, korisno, snijeg i vjetar), dok to nije slučaj s potrebnim opterećenjem [6]. Razlog leži kako u izvornim tako i u stečenim nedostacima. Izvorni su nedostaci gradnja u vrijeme nepostojanja protupotresnih propisa, propusti u projektiranju te prilikom izvođenja. Pod stečene nedostatke svrstavaju se rekonstrukcije koje nisu bile u skladu s pravilima struke (čime se oslabljuje nosiva konstrukcija) te neodržavanje zgrada i sama činjenica da im je starosna dob mnogo veća od projektiranog vijeka prema danas važećim propisima. Kod pregleda građevina ustanovljeno je kako stropne ploče nisu zadovoljavajuće povezane sa zidovima (što znači da se zgrada ne ponaša kao cjelina prilikom potresa te da se može očekivati pojava lokalnih mehanizama sloma i mehanizama sloma izvan ravnine), a sami zidovi, često upitne kvalitete, nepravilno su raspoređeni. Nadalje, najveća oštećenja imaju zgrade na uglu odnosno one koje nemaju susjedne zgrade na koje se prilikom potresnog gibanja mogu osloniti. Zaključak nakon pregleda građevina te numeričkih analiza koje su do sada napravljene jest taj da je navedene nedostatke potrebno ispraviti kada se krene u obnovu zgrada [1]. Od ukupno četiri razine obnove, za zgrade Bloka 19 zahtijevana je obnova razine 2, a prema *Odluci o donošenju Programa mjera obnove zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije* [11]. "Razinom obnove 2 vrši se popravak ili zamjena konstrukcijskih (nosivih) elemenata koji su oštećeni u potresu te se izvode određena poboljšanja konstrukcije građevine kao cjeline, koja se odnose na otpornost na djelovanje potresa. Ovom razinom treba se provesti obnova izvedbom prihvatljivih zahvata radi postizanja najmanje izvorne otpornosti, a po mogućnosti i pojačanja." [12]

Tijekom pilot - projekta za koji je određen Blok 19 svaka je od 35 građevina popisana (slika 10) te su nabrojane njene karakteristike poput smještaja unutar bloka, katnosti, godine i načina izgradnje te ostalih komponenti važnih pri prikupljanju podataka i dokumentacije za daljnji izvid i zaključke o ponašanju građevine te koracima koje je potrebno poduzeti u trenutnom stanju i za potrebe osiguranja stabilnosti i mehaničke otpornosti za buduće potrese. U tablici 1 izdvojen je prikaz jedne od 35 kuća u bloku.

Tablica 1. Blok 19: karakteristike kuće Honigsberg [2]

BR.	1
IME	Kuća Honigsberg
ADRESA	Frankopanska 2 / Ilica 41
TIP GRAĐEVINE	Uglovnica (1 šesterosobni stan na stubištu)
KATNOST	Po + P +Pk + 2
NAMJENA	Stambeno-poslovna
VRIJEME GRADNJE	1894.
REKONSTRUKCIJE	1897. pregradnja kavane u prizemlju prema projektu biroa Honigsberg i Deutsch, po narudžbi Matilde Honigsberg 1899. proširenje kavane na susjednu kuću (Ilica 41a) zapadno prema projektu biroa Honigsberg i Deutsch 1904. pregradnje mezanina prema projektu biroa Honigsberg i Deutsch 1931. pregradnja kavane u prizemlju prema projektu biroa Freudenreich i Deutsch, po narudžbi Ivane Pavelić 1936. pregradnja kavane u prizemlju prema projektu Ašera Kabilja (1903. i 1994.) Recentne pregradnje lokala u prizemlju i stanova na katovima.
SMJEŠTAJ U BLOKU	Reprezentativna historicistička dvokatnica s kupolom formira ugao bloka; istočnim ulaznim pročeljem okrenuta je prema Frankopanskoj ulici, a sjevernim pročeljem prema Ilici. Uz začelnu stranu nalazi se malo dvorište. Prema planovima iz 1853./1854. i 1864., prije je sjeverni dio izdužene pravokutne parcele (uz gornju Ilicu) zapremala kuća (Ilica 605), a južni dio dvorište. Sačuvan je nacrt iz 1878.
KROVIŠTE	Krovište je dvostrešno, prekriveno crijepom.
POMOĆNE DVORIŠNE GRAĐEVINE	U malom dvorištu u novije je doba podignuta prizemnica ravnog krova s nekoliko WC-a koji služe okolnim prodavaonicama.
MATERIJAL I TEHNIKA GRADNJE	Zgrada je zidana od opeke. Međukatne konstrukcije su drvene. Plitki svodovi od opeke u podrumu, stubištu i gospodarskim prostorijama počivaju na željeznim traverzama, a željezne konzole nose i dvorišne balkone. Stubište je kameno, a hodnici i podesti popločeni su keramičkim pločicama. Sva arhitektonska plastika pročelja izvedena je u žbuci.
GRAĐEVINSKO STANJE	Zgrada je pretrpjela znatna oštećenja u potresu 22. ožujka 2020., tako da je građevinsko stanje loše. U stubištu su vidljive brojne pukotine zidova, a žbuka je mjestimično otpala. Velikim pukotinama načeta kupola u prvom potresu, nakon novih oštećenja u idućem potresu 22. travnja, morala je biti iz sigurnosnih razloga uklonjena. Procjena statičara je: privremeno neuporabljivo.
PRIJEDLOG OBNOVE	Zgradu je nužno sanirati od posljedica potresa te je konstruktivno učvrstiti na način primjeren kvalitetnoj povijesnoj građevini. U tom procesu njezina izvorna arhitektonska obilježja (rješenje i plastika pročelja, organizacija i opremanje ulaznog prostora i stubišta, osnovna tlocrtna dispozicija stanova te unutarnja oprema) trebaju biti očuvana i restaurirana. Posebnu pozornost valja pridati rekonstrukciji kupole, a u tom kontekstu predlaže se i rekonstrukcija prije uklonjenih akroterija atike. Također se predlaže ujednačeno oblikovanje izloga u prizemlju, prema izvornom projektu i u skladu s prozorima mezanina koji su ostali očuvani. Prije cjelovite obnove zgrade, s obzirom na njezinu arhitektonsku kvalitetu i urbanističko značenje, trebalo bi izraditi konzervatorsku studiju temeljenu na restauratorskim sondiranjima. Gradski zavod za zaštitu spomenika kulture i prirode izdao je mjere zaštite.



Slika 10. Blok 19: prikaz svake pojedine građevine/zgrade [51]

### 3 Pregled dosadašnjih istraživanja

Iskustva i znanja u ovom području su vrlo ograničena zbog specifičnosti gradnje i područja ugrožena potresom. Primjerice, nedavni potresi u Italiji su izazvali oštećenja [13] uglavnom u ruralnim dijelovima i manjim gradovima pri čemu je blokovska gradnja prisutna u gradskim središtima. S druge strane, potres u Zagrebu zahvatio je glavni grad države pri čemu je ugrozio tradicijsku gradnju pretežito motiviranu austrougarskom gdje potresi nisu dominantna ugroza. Iskustva iz drugih država koje su pretrpjele razorne potrese, te istraživanja koja su temeljem toga provedena, govore kako je važno niz zgrada razmotriti kao cjelinu. Nedvojbena je interakcija zgrada u nizu, a isto se ne bi smjelo ignorirati tijekom izrade projekata sanacije ili rekonstrukcije [14].

Karakteristično za zgrade u bloku jest to da su građene na način da imaju zajednički zabatni zid ili su im zabatni zidovi izgrađeni jedan uz drugi, bez seizmičke razdjelnice ili razdjelnice koja ne ostavlja dovoljno prostora za "rad" (deformaciju) pojedine zgrade iz čega proizlazi kako je seizmički odgovor jedne zgrade u bloku ovisan o dinamičkim svojstvima drugih zgrada toga bloka. Dodatni problem također nastaje kada se jedna od zgrada u bloku ukloni te se na njenom mjestu gradi suvremena



zgrada, a sa spomenutom seizmičkom razdjelnicom. Pretpostavka je da kao rezultat dobivamo oslabljene susjedne zgrade.

Pretpostavlja se da ponašanje zgrade pri djelovanju potresa ovisi o njenom smještaju unutar bloka. Primjerice, nije jednako nalazi li se građevina između dviju susjednih ili na uglu bloka te je li pored izgrađena nova suvremena zgrada s razdjelnicama. Dodatan uvid u ovu tvrdnju može se steći promatrajući rezultate istraživanja provedenih na zgradama u bloku u Barceloni [15].

Tradicijske zgrade u blokovima/nizovima u centru Zagreba [9] uglavnom su izgrađene od nearmiranog ziđa. Uobičajeno je da su nosivi zidovi zgrada paralelni s ulicom s dva fasadna zida i jednim središnjim na koje se oslanjaju stropne grede. Na navedeno se mogu istaknuti i zidovi jezgre te zabatni zidovi koji nemaju veliku razinu vertikalnog opterećenja. Okomito na nosive zidove nalaze se zidovi manjih dimenzija između prostorija, koji stabiliziraju glavne zidove, ali nemaju značajnu nosivu funkciju s obzirom na dimenzije i nedostatak vertikalnog opterećenja. Sve navedeno ne vrijedi za zgrade na uglu obzirom da takve imaju nosive zidove i u uzdužnom i u poprečnom smjeru. Nakon pregleda građevina koje je zadesio potres te uočenih oštećenja zaključeno je kako su se zidovi u poprečnom smjeru više oštetili, radi karaktera potresa, ali i eventualnog zajedničkog djelovanja svih zidova u nizu jednog bloka (nastavljaju se u istoj osi).

Zakoni i norme koje se odnose na projektiranje zgrada fokusirani su na samostojeće zgrade odnosno nisu dostupne konkretne upute za projektiranje zgrada u nizu. Primjerice, kako uzeti u obzir susjedne građevine (u nizu/bloku) odnosno kako postaviti rubne uvjete [16] (između susjednih zidova) koji preciznije opisuju ponašanje zgrade pri djelovanju potresa, a u konačnici rezultiraju međusobno različitim potrebnim odgovorom.

Numerički modeli opisanog ponašanja mogu biti izrazito složeni pa je vrlo važno odrediti kakve modele koristiti [17] jer predetaljni mogu biti nepotrebno komplicirani i iziskivati uloženo vrijeme koje nije proporcionalno točnom rezultatu. Tu su i računske analize lokalnih otkazivanja unutar zgrada u bloku rađene na primjeru povijesnog središta Arsita u talijanskoj pokrajini Teramo [18]. Potres manjeg intenziteta, a kakav je zadesio Zagreb, više utječe na elemente manje krutosti te se nisu u potpunosti "aktivirali" glavni konstrukcijski elementi. Kod jačih potresa, elementima manjih dimenzija, koji nisu dobro povezani s ostatkom konstrukcije (slučaj kod tradicijskih građevina u Zagrebu) vrlo brzo popuste veze, oni izgube nosivost i onda glavni elementi preuzimaju "glavnu ulogu".

S druge strane, prejednostavni modeli mogu dati prekonzervativna rješenja [19 i 20]. Od postojećih istraživanja mogu se istaknuti [21 i 22] za koje se čini da je nađena optimalna mjera s obzirom na navedeno.

Eksperimentalna istraživanja, koja bi opisala ponašanje zgrada u bloku, također su vrlo rijetka, a posebice tipologije zgrada kakvu imamo u Zagrebu. Primjerice, ambi-

jentalna istraživanja koja bi mogla opisati međusobno interakciju imaju veliko osipanje rezultata na nižim, krućim zgradama i teško je precizno interpretirati rezultate. Za Zagreb postoji Studija za saniranje posljedica potresa [7] gdje su istraživanja napravljena na nekoliko zgrada u užem centru, a ista ističu da su potrebna detaljnija istraživanja što je i motivacija za ovaj doktorski rad.

## 4 Zaključak

Očekivani znanstveni doprinos kroz ovu disertaciju je aproksimacija ponašanja zgrada u bloku uslijed djelovanja potresa što bi doprinijelo stvaranju odnosno nadopunjavanju baze podataka o konstruktivnim svojstvima građevina i procjeni oštećljivosti, a posljedično i otvorilo put za određivanje obrasca ojačanja i obnove oštećenih građevina. Osnovni cilj je opisati ponašanje zgrada u bloku/nizu pri djelovanju potresa s obzirom na njihovu međusobnu interakciju. Namjera je istražiti kako suvremena zgrada izgrađena kao interpolacija u bloku/nizu djeluje na susjedne zgrade i blok/niz u cjelini, analizirati utjecaj različitih parametara kao što su visina građevine, visine pojedinih etaža, veličine i pozicija otvora susjednih građevina te numeričkim analizama, eksperimentalnim mjerenjima i analizama odrediti dodatni koeficijent za povećanje odnosno smanjenje seizmičke sile za zgrade u bloku/nizu. Hipoteza kako suvremena zgrada izgrađena uz tradicijsku nepovoljno utječe na nju za djelovanje potresa dokazivat će se kroz metodologiju i plan istraživanja koji će se sastojati prvenstveno od eksperimentalnih istraživanja te modeliranja konstrukcija i numeričkih analiza. Dodatno, analizirat će se postojeći podaci iz baza podataka, posebice baze oštećenja i uporabljivosti zgrada nakon zagrebačkog potresa te će se napraviti detaljni pregledi karakterističnih blokova (opažanje) kojima će se pokušati utvrditi stvarna oštećenja na razdjelnicama. Poseban naglasak će se staviti na Blok 19 (*case study*) i Program cjelovite obnove povijesne jezgre grada Zagreba [1] s obzirom na važnost u procesu obnove grada Zagreba.

Eksperimentalna istraživanja imaju cilj osigurati pouzdane ulazne parametre za sve kasnije analize, a posebice numeričke. Prikupljanje postojećih ispitivanja te izvedba novih ispitivanja karakterističnih mjesta na konstrukciji, materijala i slično poslužit će za kalibraciju numeričkih modela. Dodatno, ponašanje susjednih građevina će se pokušati aproksimirati eksperimentalnim mjerenjima ambijentalnih vibracija pri čemu određena iskustva već imamo u postojećim istraživanjima. Ambijentalnim ispitivanjima i usporedbom s numeričkim modelima odnosno očekivanim rezultatima, može se procijeniti utjecaj međusobne interakcije. Isto se može dodatno potvrditi opažanjem na terenu odnosno usporedbom s konkretnim podacima s obzirom na djelovanje zagrebačkog potresa.

Istraživanjem bi se osigurali kvalitetni ulazni podaci koji podrazumijevaju izvornu projektnu dokumentaciju, detaljne preglede postojećeg stanja (posebice spojeva

i razdjelnica), numeričke modele zgrada/bloka, eksperimentalna istraživanja (posebice ambijentalnih vibracija) i slično. Navedeno je ključna odrednica za analize oštećljivosti pojedinačnih građevina u nizu, i za modeliranje seizmičkog odgovora samog niza.

Planiraju se koristiti numerički modeli različite složenosti, od jednostavnih kontrolnih modela, preko modela koji se uobičajeno koriste u struci do složenih nelinearnih modela koji preciznije opisuju ponašanje, ali zahtijevaju i pouzdanije ulazne podatke. U konačnici se sve razine numeričkih modela moraju uskladiti, a cilj je dobiti rezultate koji će biti primjenjivi u struci kao preporuka.

## Literatura

- [1] Atalić, J., Lakušić S., Srkoč M., Uroš M., Baniček, M., Žagar, T., Sigmund Z., Šavor Novak M.: Program cjelovite obnove povijesne jezgre grada Zagreba – Konstruktorski modeli obnove, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatski centar za potresno inženjerstvo, 2021.
- [2] Belamarić J., Bjažić Klarin T., Damjanović D., Dundović B., Horvat-Levaj K., Horvatinčić S., Kolešnik Lj., Kraševac I., Križić Roban S., Mance I., Premerl D., Šverko A., Vučetić R., Zelić D., Žmegač A.: Program cjelovite obnove Povijesne jezgre grada Zagreba – Blok 19 – Konzervatorski model. Zagreb: Institut za povijest umjetnosti; 2021.
- [3] Babić S., Čengić D., Prgin I., Rubčić D., Senišin S. 150 godina Zagreba kao jedinstvenog grada. Zagreb: Državni arhiv u Zagrebu; 2000.
- [4] Pelz I., Problematika nekih zagrebačkih toponima i njihovih pridjeva. Jezik. 1986.; 33(97-128): 99-105.
- [5] Kahle D., Građevinski propisi grada Zagreba u razdoblju od 1850. do 1918. godine. Prostor. 2004; 12(2): 203-214
- [6] Crnogorac M. E. Općenito o konceptima sanacije i protupotresnog ojačanja zidanih konstrukcija - E.1. Izvorni i stečeni nedostaci konstrukcija zgrada. U: Uroš, M., Todorčić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S. (ur.) POTRESNO INŽENJERSTVO - Obnova zidanih zgrada. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021, str. 219-243.
- [7] Šavor Novak, M., Atalić, J., Damjanović, D., Uroš, M., Krolo, J., Sigmund, Z., Koščak, J., Korlaet, L., Bartolac, M., Duvnjak, I., Hak, S. (2018) 'Studija za saniranje posljedica potresa u Gradu Zagrebu', u Državna uprava za zaštitu i spašavanje (ur.) Zbornik VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, Zagreb, Hrvatska, 11.-12. listopada.

- [8] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Ažurirana procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj – rizik od potresa, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet u suradnji s Ministarstvom graditeljstva i prostornog uređenja i Državnom upravom za zaštitu i spašavanje, Hrvatska, 2018.
- [9] Šavor Novak M., Uroš M., Atalić J., Herak M., Demšić M., Baniček M., Lazarević D., Bijelić N., Crnogorac M., Todorić M. Potres u Zagrebu 22. ožujka 2020. - preliminarni izvještaj o seizmološkim istraživanjima i oštećenjima zgrada. Građevinar. 2020; 72(10): 843-867
- [10] HCPI: GIS karta sa podacima o upotrebljivosti zgrada, Hrvatski centar za potresno inženjerstvo, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu i Grad Zagreb, 2020.
- [11] Odluka o donošenju Programa mjera obnove zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije, Vlada Republike Hrvatske, 2021.
- [12] Crnogorac M., Todorić M., Uroš M., Atalić J.: Urgentni program potresne obnove – UPPO, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet i Hrvatska komora inženjera građevinarstva; 2020.
- [13] Di Ludovico M., Prota A., Moroni C., Manfredi G., Dolce M. Reconstruction process of damaged residential buildings outside historical centres after the L'Aquila earthquake: part I—"light damage" reconstruction. Bulletin of Earthquake Engineering. 2017; 15: 667-692
- [14] Formisano A., Florio G., Landolfo R., Mazzolani F.M. Numerical calibration of an easy method for seismic behaviour assessment on large scale of masonry building aggregates. Advances in Engineering Software. 2015; 80: 116-138
- [15] Pujades L. G., Barbat A. H., González-Drigo R., Avila J., Lagomarsino S. Seismic performance of a block of buildings representative of the typical construction in the Eixample district in Barcelona (Spain). Bulletin of Earthquake Engineering. 2012; 10: 331-349.
- [16] Borri A., De Maria A. Eurocode 8 and Italian code. A comparison about safety levels and classification of interventions on masonry existing buildings. U: Cosenza E. (ur.), Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, Napoli: Doppiavoce, 2009, str. 237-246.
- [17] da Porto F., Munari M., Prota A., Modena C. Analysis and repair of clustered buildings: Case study of a block in the historic city centre of L'Aquila (Central Italy). Construction and Building Materials. 2013; 38: 1221-1237.
- [18] Grillanda N., Valente M., Milani G. ANUB-Aggregates: a fully automatic NURBS-based software for advanced local failure analyses of historical masonry aggregates. Bulletin of Earthquake Engineering. 2020; 18(8): 3935-3961.

- [19] Uroš M., Demšić M., Šavor Novak M., Atalić J., Prevolnik S. H. Procjena ponašanja tipične zidane zgrade u Zagrebu pri potresnom djelovanju - H.2. Rizik od potresa u gradu Zagrebu. U: Uroš, M, Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S. (ur.) POTRESNO INŽENJERSTVO - Obnova zidanih zgrada. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021, str. 456-519.
- [20] Quagliarini E., Maracchini G., Clementi F. Uses and limits of the Equivalent Frame Model on existing unreinforced masonry buildings for assessing their seismic risk: A review. *Journal of Building Engineering*. 2017; 10: 166-182.
- [21] Tomić I., Penna A., DeJong M., Butenweg C., Correia AA., Candeias PX., Senaldi I., Guerrini G., Malomo D., Beyer K. Shake table testing of a half-scale stone masonry building. Submitted to *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022a.
- [22] Tomić I., Penna A., DeJong M., Butenweg C., Correia AA., Candeias PX., Senaldi I., Guerrini G., Malomo D., Beyer K. Shake-table testing of a stone masonry building aggregate: Overview of blind prediction study. Submitted to *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022b.

# Parametarsko modeliranje i varijacije oblika

**Boris Uremović<sup>1</sup>**, prof. dr. sc. **Ivica Završki<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Tehničko veleučilište u Zagrebu, buremovic@tvz.hr

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

## Sažetak

Ovaj rad ima za cilj prikazati osnovne pojmove vezane uz parametarsko modeliranje, s obzirom da je ono postalo nezaobilazni alat projektantima u graditeljstvu i ostalim područjima inženjerskog djelovanja. Bit će prikazane osnovne mogućnosti jednog od najraširenijih alata za modeliranje Rhinoceros 3D s dodatkom za parametarsko modeliranje Grasshopper, te će biti prikazana izmjena pojedinih parametara konceptualnog parametarskog modela i izrada varijantnih rješenja. Također će biti date osnovne smjernice za daljnja istraživanja i potencijal razvoja parametarskog modeliranja u budućnosti.

*Ključne riječi: parametarsko, modeliranje, dizajn, Rhinoceros, Grasshopper*

## Parametric modelling using mathematical functions

### Abstract

This paper has a goal to show basic terms regarding parametric modelling, regarding the fact that it has become an unavoidable tool for designers in architecture and civil engineering as well as in other fields of engineering. Basic tools from one of the most widespread modelling application Rhinoceros 3D and its parametric modelling addon Grasshopper will be shown, and also will be shown a development of a conceptual model and the making of variant solutions based on parameter change. References and guidelines for future research of parametric modelling will also be given.

*Key words: parametric, modelling, design, Rhinoceros, Grasshopper*

## 1 Uvod

Zadnjih godina, računalna pismenost i dostupnost tehnologije potiču ubrzani razvoj digitalnih inovacija. Projektanti svih struka potaknuti tim istim znanjem započeli su zamišljati sve odvažnije, raznolike i mijenjajuće oblike. Parametarsko modeliranje je pronašlo svoje mjesto u mnogim područjima, a pogotovo u trenucima kad svoje modele projektanti više ne mogu kvalitetno kontrolirati uobičajenim alatima ili ih predočiti klasičnim tehnikama [1]. Današnji digitalni modeli često se sastoje od složenih međudnosa opisanih algoritmima, a ta složenost je često potaknuta interdisciplinarnošću svih sudionika uključenih u procese projektiranja, izgradnje i korištenja građevina, a za takve složene digitalne modele čija struktura je opisana raznim matematički definiranim uvjetima (bilo algebarskim ili geometrijskim), najprikladnija metoda izrade bez premca je parametarsko modeliranje [2].

## 2 Pojam parametarskog modeliranja

Kako bi jednostavnije objasnili pojam parametarsko modeliranje potrebno je za početak proučiti pojmove "parametar" i "model" i njihova objašnjenja u enciklopedijama i normativnim rječnicima hrvatskoga jezika.

Tako Hrvatska enciklopedija za pojam **parametar** u [3] kaže "*matematički pojam s više značenja. Npr. (1) Varijabilna veličina čijim je posebnim značenjem određen konkretni element nekoga skupa...*" ili "*(4) Veličina u matematičkome opisu nekoga geometrijskoga objekta ili fizikalnoga zakona koja je u nekom posebnom slučaju stalna, ali za različite slučajeve poprima različite vrijednosti.*", Školski rječnik hrvatskoga jezika u [4] kaže "*veličina ili mjerilo prema kojem se što mjeri ili određuje*", a Hrvatski jezični portal u [5] pojam parametar definira kao "*matematička veličina, obično realna varijabla, čije vrijednosti služe za razlikovanje elemenata nekog skupa točaka, funkcija, jednadžbi ili drugih matematičkih objekata.*".

Za pojam **model** moguće je pronaći puno više različitih objašnjenja, a što je i logično s obzirom na postanak navedene riječi, te značenja koja povezuju područja od matematike do mode iako im je lingvistički korijen jednak. Od ponuđenih opisa i objašnjenja, iz Hrvatske enciklopedije [6] je možda najprikladnije "*Oblik (lik, tip) u koji se netko ugleda, koji uzima za primjer ili ga oponaša (reproducira); obrazac, uzorak, predložak, uzor, primjer.*", iz Školskog rječnika hrvatskoga jezika [7] najprikladnije je "*uzorak prema kojemu se izrađuju ostali proizvodi*" ili "*umanjeni prikaz kojega predmeta ili objekta*", a na Hrvatskom jezičnom portalu [8] imamo možda i ponajbolji opis "*...mat. približni opis nekih pojava ili objekata u stvarnom svijetu, uz pomoć matematičke simbolike (funkcija, jednadžbi itd.)*". Uz pojam model, kao stranu riječ, izravno je vezan i pojam modeliranje, i pojam dizajn, koje oba u svojoj najkraćoj i najjednostavnijoj formi možemo najbolje objasniti pojmom/riječi oblikovanje, odnosno postupak oblikovanja.

Iz svih navedenih definicija pojam parametarsko modeliranje (ili dizajn ili oblikovanje) je ukratko moguće opisati kao proces oblikovanja modela ili oblika pomoću matematičkih funkcija i jednadžbi, ili drugih uvjeta, korištenjem stalnih i/ili varijabilnih parametara.

### 3 Parametarsko modeliranje u projektiranju građevina

Parametarsko modeliranje (ili dizajniranje) kao pojam je prvi puta spomenuto početkom 60-ih godina prošlog stoljeća [2], te se tako gledajući ne može smatrati iznimno modernim postupkom modeliranja. Bez obzira na navedeno, tijekom zadnjih 10 godina dolazi do postupnog otvaranja sve većih mogućnosti primjene parametarskog modeliranja i to prvenstveno s dodatnim razvojem računala koja su postala neophodna za otkrivanje njegovih mogućnosti i bez kojih bi korištenje parametarskog modeliranja bilo gotovo nemoguće [9].

S obzirom da je postupak projektiranja građevina iterativni postupak, koji do rješenja dovodi najčešće višestrukim i repetitivnim ponavljanjem ustaljenih i unaprijed definiranih procedura, a pri kojim ponavljanjima se vrlo često mijenjaju samo pojedini parametri u unaprijed definiranim i strukturiranim modelima, postaje jasno zašto parametarsko modeliranje ima jasno vidljivu poveznicu s projektiranjem građevina [10, 11] i zašto je danas parametarsko modeliranje jedan od općeprihvaćenih postupaka projektiranja (ili modeliranja, ili oblikovanja). Iz istog razloga, sve je više raznih CAD alata kojima je dodana mogućnost izrade novih parametarskih modela, kao i mogućnost parametrizacije postojećih.

Svrha uvođenja parametarskog modeliranja u dosadašnje postupke projektiranja je mogućnost brze izrade varijantnih rješenja definiranjem modela čiji je izgled odnosno krajnji oblik definiran raznim parametrima i vezama tih parametara. Promjenom jednog parametra (u ovisnosti o postavljenim vezama) dolazi do automatske promjene završnog modela, a iz kojeg je posljedično moguće proučiti sve promjene koje se događaju sa završnim modelom temeljem te jedne promjene [10, 11]. Iterativnim ponavljanjem odnosno iskušavanjem različitih vrijednosti jednog ili više parametara provjeravamo kako određeni parametar utječe na završni model, te u konačnici brže i jednostavnije dolazimo do krajnjeg rezultata.

Kad govorimo o parametarskom modeliranju, nužno je spomenuti i modeliranje informacija o građevinama koje je vjerojatno bolje poznato kao engleski izraz Building Information Modelling odnosno skraćeno BIM. Nužno je naglasiti da BIM i parametarsko modeliranje nisu sinonimi iako tako nekome možda djeluju na prvi pogled. BIM je kompleksan sustav koji je nastao na nekim postulatima parametarskog modeliranja, no do danas je izrastao u općeniti smjer rada u građevinarstvu i temelj pristupa razvoju digitalnog građevinskog sektora, dok je parametarsko modeliranje samo jedan od postupaka modeliranja, ali koji se svojim osnovnim principima savršeno uklapa u principe rada BIM-a.



### 3.1 Izrada konceptualnog primjera

U ovom radu glavna tema je parametarsko modeliranje kod kojeg se parametri modela međusobno povezuju isključivo pomoću matematičkih funkcija, kako algebarskih tako i geometrijskih, a cilj je modeliranje i proučavanje potpuno novih i unikatnih konstrukcija raznih oblika (linearnog, zaobljenog, nasumičnog, organskog, odnosno bilo koje kombinacije navedenih), a koje nije moguće opisati bez upotrebe složene geometrije. Izrada takvih konstrukcija je gotovo nemoguća bez upotrebe parametarskog modeliranja na računalu jer iziskuje veliki broj ponekad vrlo kompleksnih izračuna i čiji bi izračun klasičnim metodama trajao satima, danima, a u iznimnim slučajevima čak i tjednima.

Iako modeliranje pomoću složenih geometrijskih pravila omogućava izradu modela iznimne složenosti, u ovom radu prikazati ćemo postepeni razvoj jednog pojednostavljenog konceptualnog modela od niske do srednje razine složenosti. Kao predložak za razradu konceptualnog modela poslužio je oblik poznatog londonskog nebodera na adresi 30 St Mary Axe (također poznatog pod kolokvijalnim engleskim nazivom "gherkin" – slika 1). Osnovni parametarski konceptualni model, razradu kojeg ćemo prikazati, je zakrivljena ploha nalik na češer, najveće širine po sredini te sužavanjem pri dnu i vrhu zaogrnuta cjevastim profilima nastalima iz krivulje prodira zavojne plohe i osnovnog modela. Iako je zgrada nestandardnog oblika i potpuno je zaobljene fasade, zbog specifične geometrijske konstrukcije fasadni paneli korišteni na cijeloj zgradi nisu zakrivljeni nego su ravne plohe.

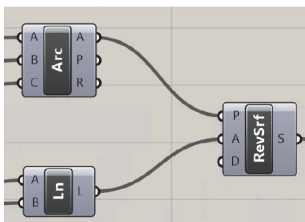


Slika 1. Londonski neboder na adresi 30 St Mary Axe

Osnovni parametarski model nastaje postepeno po sljedećim glavnim koracima:

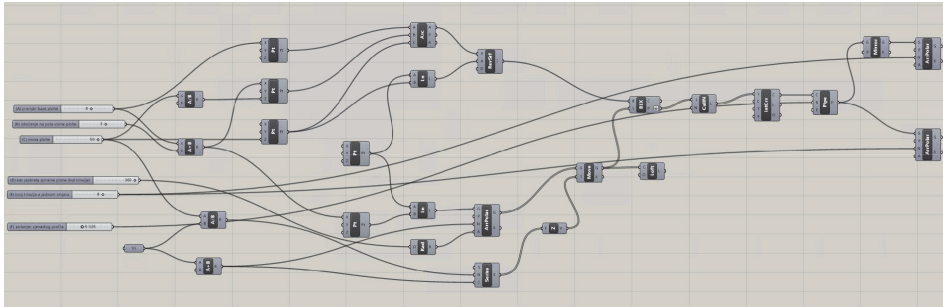
- Izrada krivulje kružnog luka koji će poslužiti kao profilna krivulja za izradu osnovne plohe, a korišteni parametri su: polumjer baze plohe (A); izbočenje plohe na pola visine u odnosu na polumjer baze plohe (B), visina plohe (C).
- Izrada rotacijske plohe pomoću krivulje kružnog luka.
- Izrada zavojne plohe koja će poslužiti za izradu prodorne krivulje za potrebe izrade cjevastih profila, a korišteni parametri su: visina plohe (C), kut zaokreta zavojne plohe (D).
- Izrada prodorne krivulje između osnovne plohe i zavojne plohe.
- Izrada cjevastog profila i njegovo pravilno umnažanje u konačni oblik, a parametri koji su korišteni su: broj krivulja u jednom smjeru (E), polumjer cjevastog profila (F).

Za izradu modela korišten je računalni program za modeliranje Rhinoceros s dodatkom za parametarsko modeliranje Grasshopper, koji za izradu parametarskog modela koristi grafičko sučelje koje se sastoji od čvorova i međusobnih veza. Čvorovi mogu biti ili čvorovi s ulaznim parametrima ili čvorovi s operacijama. Ulazni parametri mogu biti u numeričkom obliku (realni ili cijeli brojevi, te parni ili neparni brojevi – oboje u formi pojedinačnih brojeva, nizova ili sekvenci, te pravilnih ili nasumičnih lista), no mogu biti i unaprijed izrađene točke, krivulje ili plohe. Operacije mogu biti raznih vrsta kao što su algebarske (npr. zbrajanje, množenje, potencija, polinom,...), trigonometrijske (npr. sinus, kosinus,...), operacije za izradu krivulja i ploha i njihovu analizu, ili operacije triangulacije, presjeka, transformacije. Sve navedene operacije su one koje su često korištene no one čine tek manji dio ukupno dostupnih. Na slici 2 je prikazan primjer izgleda strukture (čvorovi i veze). Čvorovi imaju ulaznu (lijevu) i izlaznu (desnu) stranu s priključnim mjestima na koje je moguće prema potrebi spajati jednu ili više veza i koji omogućavaju da rezultat jedne operacije postane ulazni parametar druge operacije, te na taj način omogućuju izradu parametarskih modela velike složenosti.



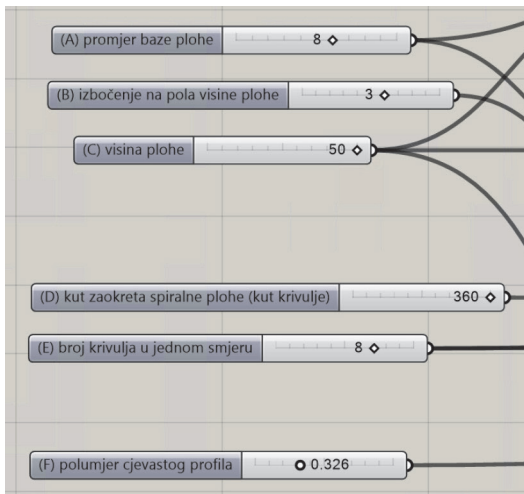
Slika 2. Tri čvora s međusobnim vezama

Na slici 3 je prikazan shematski raspored završenog parametarskog modela konceptualnog primjera.



Slika 3. Shematski raspored završenog parametarskog modela konceptualnog primjera sa čvorovima i vezama

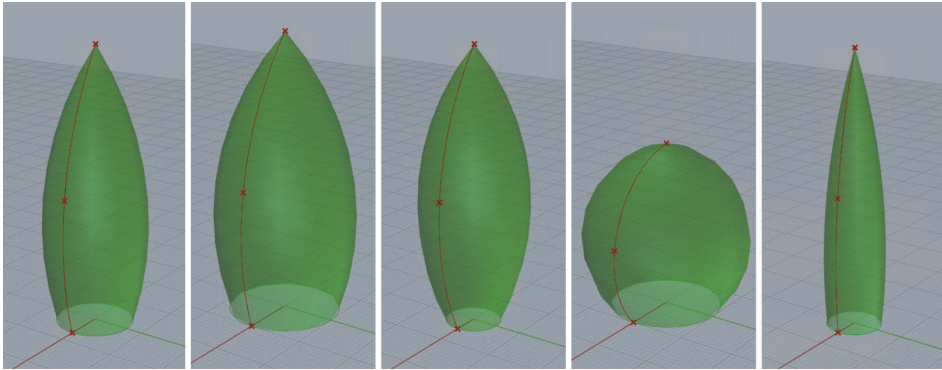
Na slici 4 su prikazani čvorovi u obliku klizača s promjenjivim ulaznim parametrima označeni slovima od A do F, a koji su na shematskom rasporedu cijelog parametarskog modela (slika 3) prikazani s lijeve strane.



Slika 4. Čvorovi s ulaznim parametrima

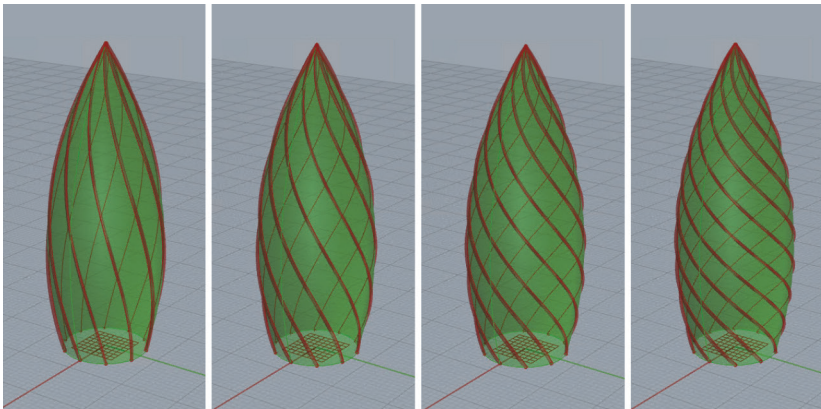
### 3.2 Izmjena konceptualnog primjera – varijantna rješenja

Izmjenom parametara modela cilj je stvoriti varijantna rješenja. Redoslijed promjene parametara nije zadan niti modelom niti njegovom strukturom, a redoslijed ovisi prvenstveno o namjeri i umnom procesu projektanta. S obzirom na model, jedan od mogućih redoslijeda je taj da se u prvom koraku napravi izmjena parametara A, B, C koji definiraju osnovne konture osnovne plohe. Na slici 5 prikazane su varijante osnovne plohe s obzirom na različite vrijednosti parametara A, B, C.



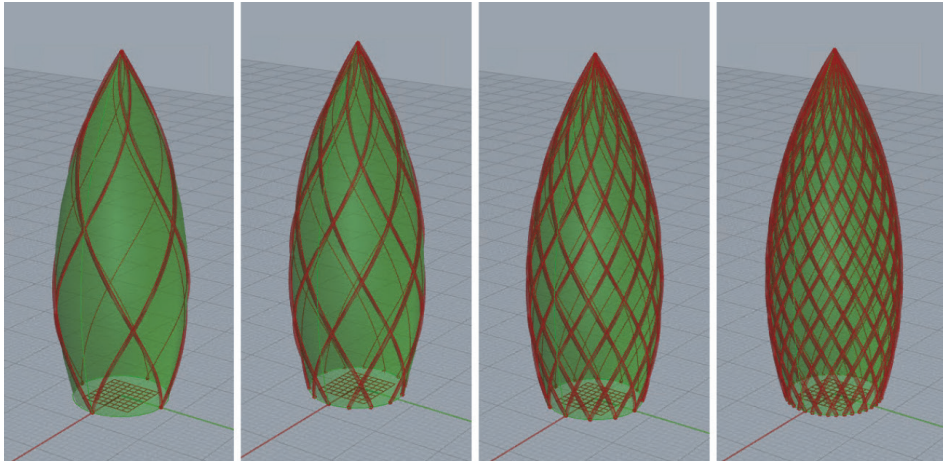
Slika 5. varijante osnovne plohe na temelju parametara A, B, C

Nakon definiranja zadovoljavajućeg oblika osnovne plohe, drugi mogući korak bi bio određivanje najvećeg kuta zakrenutosti cjevaste plohe oko osnovne plohe (parametar D). Na slici 6 prikazan je izgled cjevastih ploha u ovisnosti o veličini parametra D.



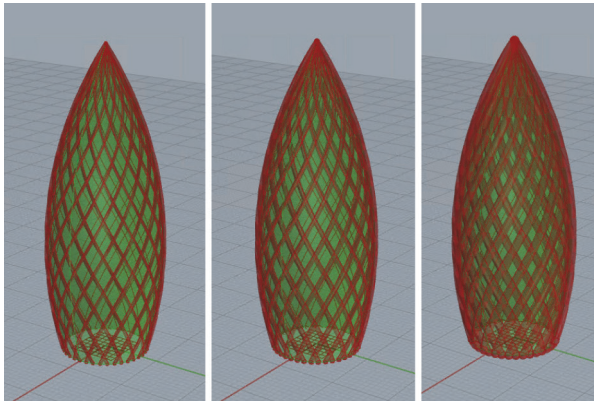
Slika 6. varijante cjevastih ploha na temelju parametra D (90, 180, 270, 360 stupnjeva)

Nakon definiranja zadovoljavajućeg oblika osnovne plohe, i zadovoljavajućeg oblika cjevastih ploha, treći mogući korak bi bio određivanje broja cjevastih ploha zavrnutih oko osnovne plohe u jednom smjeru (parametar E). Na slici 7 prikazan je raspored cjevastih ploha u ovisnosti o veličini parametra E. Kod ovog parametra u slučaju parnog broja cjevaste plohe imaju zajedničke početne točke, a u slučaju neparnog broja cjevaste plohe počinju iz različitih točaka (primjer navedenog je vidljiv na slici 7).



Slika 7. raspored cjevastih ploha na temelju parametra E (4, 5, 12, 19 ploha u jednom smjeru)

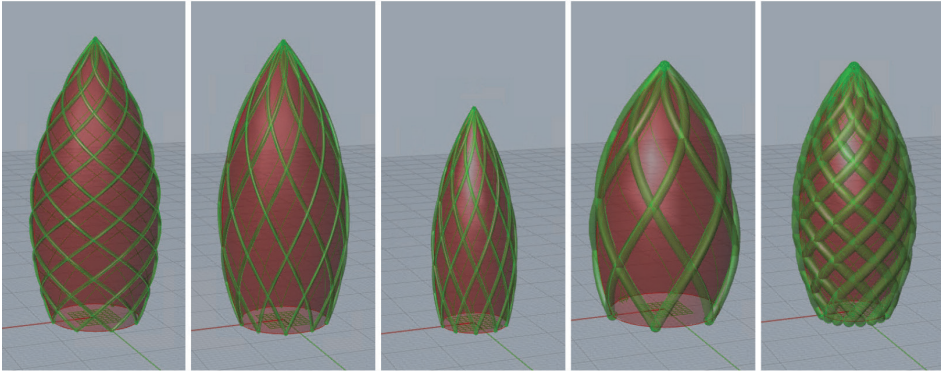
Nakon definiranja zadovoljavajućih parametara A, B, C, D i E, četvrti korak bi bio definiranje promjera cjevastih ploha (parametar F). Na slici 8 prikazana su varijantna rješenja u ovisnosti o veličini parametra F.



Slika 8. izgled cjevastih ploha na temelju parametra F (promjer cijevi 0.2, 0.4, 0.7)

Na temelju strukture izrađenog parametarskog modela i variranjem svih ulaznih parametara napravljena su različita varijantna rješenja modela (slika 9), koja se naknadno mogu analizirati, može im se provjeriti mehanička otpornost, provjeriti postoje li kritična mjesta s aspekta prostornog rasporeda, ili napraviti bilo koje drugo ispitivanje koje može utjecati na završni oblik. Iterativnim ponavljanjem postupka izmjena parametara i ispitivanjem novih varijantnih rješenja dolazi se do konačnog optimalnog modela.





Slika 9. Varijantna rješenja modela temeljena na različitim ulaznim parametrima

Također, važno je napomenuti da je modele napravljene pomoću alata Grasshopper moguće izvesti u više različitih datotečnih formata kako bi bili prikladni za uvoz u druge alate kojima se mogu provoditi daljnje analize modela i vizualizacije rezultata.

#### 4 Smjernice za daljnje istraživanje

Koncept parametarskog modeliranja poznat je i u velikoj većini slučajeva jasno definiran, no složenost modela i gotovo neograničene mogućnosti njihove izrade pred projektante stavljaju potrebu za definiranjem sve složenijih i detaljnijih parametarskih modela. Složeniji modeli imat će sve više i više čvorova sa sve složenijim operacijama, a veze među parametrima i operacijama će isto tako postajati sve više detaljne i složene, no već se pojavljuje potreba za izradom novih vrsta operacija. Kod izučavanja strukture čvorova i njihovih veza, veliki naglasak se mora dati na istraživanje i razumijevanje procesa izgradnje građevina i sve više prisutne moderne tehnologije građenja poput 3D ispisa raznim materijalima (beton, polimeri, čelik, aluminij,...) [12], gradnje robotima [13] ili bespilotnim letjelicama [14], i drugih tehnologija izgradnje čije otkrivanje tek slijedi.

Usmjeravanje pažnje na istraživanje mogućnosti primjene svih navedenih modernih tehnologija gradnje bitno je zato što još uvijek, bez obzira na povećanu upotrebu računala i korištenja digitalnih modela građevina, tijekom procesa izgradnje sve što je opisano digitalnim modelom mora biti prenijeto na papir kako bi podaci bili čitljivi izvođačima. To postaje još kompleksnije prilikom svake izmjene projekta, jer svaka izmjena mora jasno i jednostavno biti predočena svim sudionicima, a pogotovo radnicima koji te izmjene moraju usvojiti i primijeniti prilikom izgradnje. Kad dodatno u obzir uzmemo povećanu kompleksnost modernih građevina, koje izlaze iz okvira unificiranosti i uobičajenosti, te mogućnosti njihove brze i jednostavne izmjene korištenjem parametarskog modeliranja, ta digitalno-analoga pretvorba podataka iz

digitalnog modela na papir postaje višestruko složenija i postaje gotovo presudan dio koji značajno utječe na cjelokupni proces izgradnje.

Upotrebom 3D pisača, robota, bespilotnih letjelica ili sličnih strojeva i/ili uređaja, nestaje ili se drastično umanjuje potreba za takvom pretvorbom, jer je digitalni model moguće izravno prenijeti u programske instrukcije koje određuju njihovo ponašanje do najsitnijih detalja. Potrebno je stoga dodatno istražiti te tehnologije i utvrditi na koje ih je načine moguće prilagoditi i uklopiti u trenutne procese izgradnje, odnosno na koji je način potrebno transformirati procese izgradnje kako bi odgovarali tehnologijama koje zasigurno još uvijek nisu doživjele primjenu svih svojih potencijala u graditeljstvu.

## 5 Zaključak

Ključ parametarskog modeliranja se nalazi u poznavanju parametara koji određuju model i u poznavanju rubnih uvjeta unutar njega, te u činjenici da mijenjanjem bilo kojeg parametra u konačnici mijenjamo cjelinu. Parametarsko modeliranje nam omogućava izradu velikog broja varijacija oblika modela, a koji se svaki prikazuje u određenom svjetlu prema uvjetima koji su postavljeni pred njega, bili oni oblikovni, strukturalni ili okolišni. Upotrebom parametarskog modeliranja moguće je stvoriti kompleksne geometrijske oblike koji donedavno nisu bili primjenjivani u projektiranju građevina što zbog svojeg oblika, a što zbog nepoznatih svojstava. Koristeći sve postupke koje omogućava parametarsko modeliranje, moguće je stvoriti inovativne konstrukcije, te utvrditi njihove karakteristike i njihovu prikladnost za pojedinu svrhu. Iako je parametarsko modeliranje na računaru sa svojim razvojem počelo još pred više od 50 godina, razvoj računalne opreme i povećanje njenih mogućnosti omogućili su velike pomake u pristupačnosti raznih alata za parametarsko modeliranje, koji više ne spadaju u kategoriju usko specijaliziranih alata nego ih se može staviti uz bok svim uobičajenim CAD alatima. Osim alata koji se koriste u procesu projektiranja korištenjem parametarskih modela, veliku ulogu će u budućnosti igrati i razne nove tehnologije gradnje koje će prema svim očekivanjima iznjedrati velike promjene u cjelokupnom graditeljstvu.

## Literatura

- [1] Dimitrijević Jovanović, D., Radović, Lj.: Parametric modelling in Architecture, The 5th International conference mechanical engineering in XXI century, Niš, 2020
- [2] Al-Azzawi, T., Al-Majidi, Z., Parametric architecture: the second international style, 4th International Conference on Engineering Sciences (ICES 2020), Kerbala, 2020

- 
- [3] parametar. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 10. 7. 2022. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=46627>
- [4] parametar. Školski rječnik hrvatskoga jezika, mrežno izdanje. Institut za hrvatski jezik i jezikoslovlje i Školska knjiga, 2012. Pristupljeno 10. 7. 2022. <https://rjecnik.hr/search.php?q=parametar>
- [5] parametar. Hrvatski jezični portal. Znanje. Pristupljeno 10. 7. 2022. [https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search\\_by\\_id&id=eFZgXhk%3D&keyword=parametar](https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=eFZgXhk%3D&keyword=parametar)
- [6] model. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 10. 7. 2022. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=41453>
- [7] model. Školski rječnik hrvatskoga jezika, mrežno izdanje. Institut za hrvatski jezik i jezikoslovlje i Školska knjiga, 2012. Pristupljeno 10. 7. 2022. <https://rjecnik.hr/search.php?q=model>
- [8] model. Hrvatski jezični portal. Znanje. Pristupljeno 10. 7. 2022. [https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search\\_by\\_id&id=e1lhWBY%3D&keyword=model](https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=e1lhWBY%3D&keyword=model)
- [9] Riekstins, A., Teaching Parametricism as a Standard Skill for Architecture, International Conference "Architectural Practice and Education", 2018 (42), pp 34-39
- [10] Tedeschi, A., AAD\_Algorithms-Aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper, 2014, Le Penseur
- [11] Tedeschi, A., Parametric architecture with Grasshopper, 2011, Le Penseur
- [12] Soltan, D.G., Li, V.C., A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing, Cement and Concrete Composites, 2018, Elsevier
- [13] Afsari, K., et al., Applications of Collaborative Industrial Robots in Building Construction, 54th ASC Annual International Conference Proceedings, 2018, pp 472-479
- [14] Goessens, S., et al., Parametric Design of Drone-Compatible Architectural Timber Structures, Proceedings of the IASS Annual Symposium, Boston, 2018, pp 1-8





# Usavršavanje na Sveučilištu u Parizu iz područja primjene georadara u ispitivanju armiranobetonskih konstrukcija

Ksenija Tešić

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

## Sažetak

Cilj ovog usavršavanja, koje je provedeno na Sveučilištu *Gustave Eiffel* u Parizu, bilo je proširiti znanja iz područja georadara. Jedna od najatraktivnijih primjena ove nerazorne metode u ispitivanju armiranobetonskih konstrukcija je procjena stanja korozije armature. Glavna tema usavršavanja bila je numeričko modeliranje u programskom paketu *gprMax*, koji služi za simulaciju ponašanja elektromagnetskih valova. Konkretno, ova će prezentacija prikazati modeliranje armiranobetonskog elementa u okolišu karakterističnom za koroziju primjenom *gprMax* softvera.

*Ključne riječi: georadar, nerazorne metode, beton, armatura, usavršavanje*

## Training at the University in Paris in the application of ground penetrating radar in the testing of reinforced concrete structures

### Abstract

The aim of this training, held at University Gustave Eiffel in Paris, is to increase knowledge in the field of ground penetrating radar. One of the most attractive applications of this non-destructive method in the testing of reinforced concrete structures is the evaluation of the corrosion of the reinforcement. The main topic of the training was numerical modelling with the software package *gprMax*, which is used to simulate the behaviour of electromagnetic waves. In particular, this paper presents the modelling of a reinforced concrete element in a corrosive environment in *gprMax*.

*Key words: ground penetrating radar, non-destructive methods, concrete, reinforcement, training*

## **Dodatno obrazovanje i stručno usavršavanje: Treća Infrastar trening škola, Nantes, Francuska**

**Karlo Ožić**

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

### **Sažetak**

U razdoblju od 26. do 29. lipnja u sklopu Europskog projekta Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie INFRASTAR održana je treća u nizu trening škola na sveučilištu Ecole de Centrale u Nantesu, Francuskoj. Ideja je bila okupiti mlade istraživače iz znanstvenog zvanja i iz struke u svrhu prikupljanja novih vještina i širenja mreže budućih potencijalnih suradnika. U četiri dana održan je niz predavanja te obilazak svih laboratorija na kampusu. Trening škola bila je podijeljena na tri modula koju su obuhvaćali teme vezane za monitoring, pouzdanosti, rizik, donošenje odluka i održavanje postojećih konstrukcija. U sklopu trening škole također su bila organizirana neformalna druženja na kojima su sudionici mogli naučiti o radu na drugim sveučilištima i upoznati se s poljima rada drugih sudionika. Trening škola bila je usko povezana s projektom na kojem je autor zaposlen te s aktualnim poljem rada na održavanju i praćenju stanja postojećih konstrukcija.

*Ključne riječi: dodatno obrazovanje, usavršavanje, monitoring, pouzdanost, trening škola, postojeće konstrukcije*

## **Supplementary education and professional development: 3<sup>rd</sup> INFRASTAR Training school, Nantes, France**

### **Abstract**

In the period of 26.-29. of June in the scope of European project Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie INFRASTAR 3<sup>rd</sup> training school was held at the University Ecole de Centrale in Nantes, France. The main idea was to gather young researchers both from the science field and from profession in order to gain new skills and to expand their network with potential associates. A series of lectures and a tour of all laboratories on campus were held over four days. The training school was divided into three modules covering topics related to monitoring, reliability, risk, decision making and maintenance of existing structures. As part of the training school, informal gatherings were also organized where participants could learn about working at other universities and get to know the fields of work of other participants. The training school was closely connected with the project on which the author is employed and with the current field of work on maintaining and monitoring the condition of existing structures.

*Key words: supplementary education, professional development, monitoring, reliability, training school, existing structures*

## **Dodatno obrazovanje i usavršavanje: Treća INSPIRE trening škola, Atena, Grčka**

**Ivan Hafner, Luka Lulić**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet

### **Sažetak**

Treća u nizu trening škola INSPIRE privukla je niz stručnjaka iz cijeloga svijeta s primarnom idejom prikupljanja novoga znanja te implementacije novih koncepata za učinkovitu zaštitu konstrukcija od potresa i drugih izvora buke i vibracija. U sklopu trening škole održano je 17 predavanja. Uz prikupljanje novoga znanja, cilj je bio sklapanje novih poznanstava te širenje mreže znanstvenika s ciljem buduće suradnje. Dio predavanja na trening školi bavio se postojećim konstrukcijama i njihovom potresnom obnovom što je od velike važnosti za same autore ove prezentacije i građevinsku struku u Hrvatskoj općenito.

*Ključne riječi: dodatno obrazovanje, usavršavanje, procjena postojećih građevina, seizmika, seizmička zaštita*

## **Supplementary education and professional development: 3<sup>rd</sup> INSPIRE Training school, Athens, Greece**

### **Abstract**

The 3<sup>rd</sup> INSPIRE Training school brought together a great number of experts from around the world with the main goal of gathering knowledge and implementing new and innovative concepts for sustainable seismic protection of structures and for sustainable protection against noises and vibrations. 17 different lectures were given. Besides knowledge gathering, one of the most important goals was to meet new people and colleagues with the idea of forming future collaborations. Some of the lectures included subjects on existing buildings and their seismic retrofitting which of course is of great importance to the authors of this presentation and the civil engineering community in Croatia in general.

*Key words: supplementary education, professional development, assessment of existing structures, seismics, seismic protection*

## Iskustva s online seminara “Introduction to fe-safe” i primjena u znanstvenom radu

**Maja Baniček**

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

### Sažetak

U ovoj prezentaciji predstaviti će se iskustva s dvodnevnom online seminarom “Introduction to fe-safe” (“Uvod u fe-safe”) održanog 2. i 3. prosinca 2021. godine. SIMULIA fe-safe je računalni program i dodatak programskom paketu Abaqus te služi za analizu zamora materijala i određivanja vijeka trajanja pojedinih konstruktivnih elemenata. Ovaj dvodnevni seminar je početni seminar kojim se stječu znanja i vještine za analizu zamora koristeći rezultate numeričkih proračuna provedenih u Abaqusu na modelima temeljenim na metodi konačnih elemenata (MKE). Uz opsežna predavanja, seminar uključuje i radionice pa time polaznik osim teorijskog znanja, stječe i praktične vještine na konkretnim primjerima. U ovoj prezentaciji će se dati kratki pregled seminara i pokazati primjer primjene programskog paketa Abaqus i fe-safe alata na analizu zamora geometrijski parametriziranih elastičnih pritiskalica za pričvršćenje tračnica na podlogu koja je provedena u okviru jednog znanstvenog istraživanja.

*Gljučne riječi: Abaqus, metoda konačnih elemenata (MKE), fe-safe, analiza zamora*

## Sharing experiences from the training course “Introduction to fe-safe” and application to scientific work

### Abstract

In this presentation, experiences from the two-day online training course “Introduction to fe-safe”, held on December 2-3, 2021, will be presented. SIMULIA fe-safe is a computer program and add-in for Abaqus used for fatigue analysis of materials and durability of structural elements. This course is a basic course intended to improve knowledge and skills in the fatigue analysis using results of numerical calculations and numerical models based on finite element method (FEM). In addition to comprehensive lectures, the training course also includes workshops. In this way, the participants acquire theoretical and practical skills for solving real-world engineering problems. This presentation will give a brief overview of the seminar and show an example of the application of Abaqus and the fe-safe tool for fatigue analysis of geometrically parameterized elastic clips for fixing rails to the base, which was carried out as a part of scientific research.

*Key words: Abaqus, fe-safe, Finite Element Method (FEM), fatigue analysis*

# Radionica projekta HARMOTRACK

doc. dr. sc. **Ivo Haladin**

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

## Sažetak

Radionica projekta Harmotrack održana je u sklopu 4. Plenarnog sastanka projekta (4<sup>th</sup> UIC Harmotrack Project Plenary Meeting) 2. i 3. prosinca 2021. godine u središtu UIC-a, u Parizu, Francuska. Radionica UIC-a u sklopu projekta "UIC Harmotrack" vezana uz vibracije na željeznicama daje uvid u trenutno stanje područja i trendove vezane za razvoj znanstvenih istraživanja iz spomenutog područja. U sklopu jednodnevne radionice obrađene su teme vezane uz ključne parametre i granične vrijednosti koje se postavljaju na izmjerene vrijednosti vibracija, metode i tehnike strojnog učenja i primjene umjetne inteligencije za rješavanje složenih mehanizama prijenosa i interpretacije podataka vezanih uz vibracije željezničkih vozila, mogućnosti primjene "low-cost" uređaja kao što su mobilni telefoni za akviziciju podataka o vibracijama, te mogućnosti detekcije nepravilnosti na vozilima i kolosijeku. Drugi dan radionice bio je posvećen terenskom obilasku laboratorija za ispitivanje željezničke opreme te laboratorija za ispitivanje tračnica pri SNCFu. Sudjelovanje na radionici doprinijelo je povezivanju znanstvenika, razmjeni iskustava u istraživanju te savladavanju novih tehnika obrade podataka vezanih za područje vibracija u željezničkom prometu.

*Ključne riječi: HARMOTRACK, vibracije, željeznice, strojno učenje, pametni telefoni*

## HARMOTRACK project workshop

### Abstract

HARMOTRACK project workshop has been held in scope of 4th plenary project meeting on 2nd and 3rd of December 2021 in UIC headquarters, Paris, France. Workshop is related to vibrations on railways and gives an insight into state of the art related to scientific research in the field. In scope of first day of workshop following topics have been addressed: key parameters and limit values for measured vibration levels, methods of machine learning and artificial intelligence used for solving complex mechanisms and data interpretation related to railway vibrations, possibility of use of low-cost devices such as smartphones for railway vibration data acquisition, possibility of train and track defect detection using vibrations. Second day of workshop two technical visits took place, to track component testing laboratory and rail testing laboratory at SNCF. Participation in the workshop contributed to scientific dialogue, sharing experiences in research and acquiring new techniques related to railway vibration processing.

*Key words: HARMOTRACK, vibrations, railways, machine learning, smartphones*

# Usavršavanje u području razvoja algoritma za poboljšanja numeričkih modela mostovnih konstrukcija

Suzana Ereiz

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

## Sažetak

Od vremena projektiranja konstrukcija mostova do danas, gustoća i veličina opterećenja su se povećale, dok su, s druge strane, zahtjevi regulative i trenutno važećih propisa sve stroži. Vrste konstrukcija kao što su mostovi, imaju svoju rezervnu nosivost koja se može odrediti kombiniranjem dinamičkih ispitivanja konstrukcije i metoda poboljšanja numeričkih modela kako bi se minimizirale razlike između stvarnog i predviđenog ponašanja konstrukcije. Istraživački tim Visoke tehničke škole sa Sveučilišta u Sevilli bavi se problematikom poboljšanja numeričkih modela mostovnih konstrukcija primjenom dinamičkim parametara. Osim toga, bave se razvojem optimizacijskih algoritama, najčešće temeljnih na metodi maksimalne vjerojatnosti, kako bi se razvio učinkovit i efikasan algoritam za provedbu poboljšanja numeričkih modela. U ovom predavanju predstavljen je koncept provedbe poboljšanja numeričkih modela. Također, prikazan je optimizacijski algoritam temeljen na teoriji igara razvijen u okviru provedenog usavršavanja u suradnji istraživačkog tima Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i istraživačkog tima sa Sveučilišta u Sevilli.

*Ključne riječi: dinamički parametri konstrukcije, poboljšanje numeričkih modela, mostovne konstrukcije, metoda maksimalne vjerojatnosti, teorija igara*

## Training in the development of an optimization algorithm for the finite element model updating of bridge structures

### Abstract

From the time of designing bridges until today, the density and the magnitude of the load have increased, while on the other hand, the requirements of regulations and applicable standards are becoming more stringent. Structures such as bridges have a reserve capacity that can be determined by combining dynamic structural testing and performing the finite element model updating methods to minimize the differences between the behavior predicted by the numerical model and the actual behavior of the structure. The research team of the Higher Technical School of the Engineering University of Seville deals with the finite element model updating problem. Moreover, they are engaged in the development of optimization algorithms, mostly based on the maximum likelihood method, in order to develop an efficient and effective algorithm for performing the finite element model updating process. In this presentation, the concept of implementing finite element model updating is introduced. Also, an optimization algorithm based on game theory is developed, developed as part of the training conducted in cooperation with the research team of the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb and the research team from the University of Seville.

*Key words: structural dynamic properties, finite element model updating, bridges, maximum likelihood method, Game theory*

# Uvod u COMSOL Multiphysics

izv. prof. dr. sc. **Ivan Halkijević, Katarina Licht**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, klicht@grad.hr

## Sažetak

Cilj prezentacije je predstaviti softverski paket Comsol Multiphysics. Ovaj program, zasnovan na naprednim matematičkim metodama, može se koristiti za simulaciju dizajna, uređaja i procesa u svim područjima inženjerstva, proizvodnje i znanstvenih istraživanja. Omogućuje višefizikalne simulacije, odnosno proučavanje međusobnog djelovanja više različitih fizikalnih fenomena (definiranih jednažbama) u nekom sustavu. Kroz nekoliko primjera, ukazat će se na širok raspon primjene programa. Mogućnosti modeliranja će se detaljnije prikazati kroz model sekundarnog taložnika.

*Ključne riječi: COMSOL, softver, modeliranje, simulacije, višefizikalne simulacije*

## Introduction to COMSOL Multiphysics

### Abstract

The purpose of the presentation is to introduce the Comsol Multiphysics software package. This program, based on advanced mathematical methods, can be used to simulate designs, devices and processes in all areas of engineering, manufacturing and scientific research. It enables multiphysics simulations, i.e. the study of the interaction of several different physical phenomena (defined by equations) in a system. A wide range of program applications will be demonstrated with some examples. The modeling capabilities will be presented in more detail using the model of a secondary clarifier.

*Key words: software, COMSOL, modelling, simulation, multiphysics*



## Usavršavanje u području laboratorijskih mjerenja primjenjivih u hidrotehnici

**Robert Fliszar**

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

### Sažetak

Cilj je ovoga rada prikaz stečenih znanja u sklopu znanstvenog usavršavanja na ljetnoj školi W.A.T.E.R. provedenoj na Institutu Superior Técnico Sveučilišta u Lisabonu. Ljetna škola koncipirana je na način da se nauče različite tehnike laboratorijskih i terenskih mjerenja korištene u području hidrotehnike. Prvi dio ljetne škole odrađen je kroz teorijska predavanja svih metoda mjerenja koja će se koristiti, dok je drugi dio odrađen kao praktični prikaz svake metode. U sklopu drugoga dijela, svaki sudionik ljetne škole imao je priliku odraditi mjerenja na različitim fizičkim modelima u hidrotehničkom laboratoriju Instituta Superior Técnico, koristeći sve metode mjerenja prethodno objašnjene u sklopu predavanja. Zaključni dio proveden je kao provjera stečenih znanja, koja je također podijeljena na teorijski i praktični dio. Svaki sudionik morao je odgovoriti na teorijska pitanja o svakoj pojedinoj metodi mjerenja i odraditi prezentaciju rezultata koje je izmjerio u laboratoriju i naknadno obradio.

*Ključne riječi: W.A.T.E.R., laboratorijska mjerenja, usavršavanje, hidrotehnika*

## Training in the field of laboratory measurements applicable in hydraulic engineering

### Abstract

The aim of this work is to present the knowledge acquired during the scientific training at the W.A.T.E.R. Summer School, held at the Institute Superior Técnico of the University of Lisbon. The summer school was designed to teach different techniques for laboratory and field measurements in the field of hydraulic engineering. The first part of the summer school consisted of theoretical lectures on all the measurement methods used, while the second part was conducted as a practical demonstration of each method. In the second part, each participant of the summer school had the opportunity to perform measurements on different physical models in the laboratory of the Institute Superior Técnico, applying all the measurement methods previously explained in the lecture. The last part was conducted as a test of the acquired knowledge, which was also divided into a theoretical and a practical part. Each participant had to answer theoretical questions about each measurement method and prepare a presentation of the results measured in the laboratory and subsequently processed.

*Key words: W.A.T.E.R., laboratory measurements, training, hydraulic engineering*

# Katastar digitalne građe kao osnova za kružni grad

prof. dr. sc. **Iva Kovačić**

TU Wien, Department for Integrated Planning and Industrial Building, Vienna

## Sažetak

Postojeće zgrade i infrastrukture predstavljaju najveću zalihu materijala industrijskih gospodarstava. Kako bi se smanjila uporaba primarnih resursa, emisija stakleničkih plinova te potrošnja energije za proizvodnju novih materijala, koristi se strategija "urbanog rudarenja" kojom se nastoje reciklirati te urbane zalihe. Za povećanje stope recikliranja u građevinskim procesima, potrebno je detaljno znanje o sastavu građevinskih zaliha, kao i nove metode i digitalni alati za procjenu, modeliranje i predviđanje nadolazećih tokova materijala u budućnosti. Izazovi i moguća rješenja raspravit će se i bit će prikazani na primjeru dva istraživačka projekta – a) BIMaterial: "Oblikovanje postupka za materijalnu putovnicu utemeljenu na BIM-u" te b) BIM-Stocks: "Digitalna platforma za urbano rudarenje: Procjena sastava materijala postojećih zgrada uz pomoć BIM i GIS tehnologije" - koje koriste materijalne putovnice i inovativne tehnologije skeniranja uz pomoć radara kojim se prodire u tlo, procijenio se sastav materijala zgrada iz izvjesnog vremenskog perioda, čime se omogućila izgradnja osnove za katastar digitalne građe grada Beča.

*Ključne riječi: materijalna putovnica, kružno građenje, kružno gospodarstvo, učinkovita primjena resursa, BIM*

## Digital Material Cadaster as a fundament of Circular City

### Abstract

Building stocks and infrastructures are representing the largest material stock of industrial economies. In order to minimize the use of primary resources, greenhouse gas emissions as well as energy consumption for production of new materials, the "Urban Mining" strategy aims to recycle these urban stocks. For enabling of reduction of material footprint as well as to increase recycling rates detailed knowledge about the composition of building stocks is needed, as well as new methods and digital tools for assessment, modelling and prediction of upcoming material flows in the future. This questions and possible solutions will be discussed and demonstrated on results of funded research projects BIMaterial: "Process-Design for a BIM-based Material Passport" – where digital BIM based Material Passports were developed; and BIM\_Stocks: Digital Urban Mining Platform: Assessing the material composition of building stocks through coupling of BIM to GIS" – where using Material Passports and innovative Ground-penetrating Radar scanning technology, material composition of existing stocks was assessed, thus building a fundament for a digital material cadaster of the city of Vienna.

*Key words: material passport, circular construction, circular economy, resources efficiency, BIM*

## Iskustva doktorskog studija i primjena stečenih znanja za kombinirani rad u industriji i akademskoj zajednici

doc. dr. sc. **Domagoj Nakić**

WYG savjetovanje d.o.o., domagoj.nakic@wyg-c.eu

### Sažetak

Kroz predavanje će se predstaviti iskustva s doktorskog studija s naglaskom na kombinaciji znanstveno-istraživačkog rada na projektu HRZZ-a i stručnim projektima Zavoda za hidrotehniku kao dobar temelj za daljnju nadogradnju specifičnih znanja i vještina u praksi. Prezentirat će se primjena znanja stečenih kroz iskustvo definiranja smjera doktorskog istraživanja u industriji i realizaciji realnih projekata od izrade dokumentacije do sudjelovanja u građenju. Stečena znanja i titula doktora znanosti neupitno pridonose vidljivosti i prepoznatljivosti mladih stručnjaka.

*Ključne riječi: koristi doktorskog studija, rad u industriji, akademska zajednica, prepoznatljivost mladih stručnjaka*

## Doctoral study experiences and application of acquired knowledge for combined work in industry and academia

### Abstract

The lecture shows experiences from the doctoral study with emphasis on the combination of scientific research work on the HRZZ project and professional projects of the Department of Hydroengineering as a good basis for further upgrading specific knowledge and skills in practice. The application of acquired knowledge in defining research in industry and real projects, from design to construction phase, is presented. The acquired knowledge and the PhD title unquestionably contribute to the visibility and recognizability of young professionals.

*Key words: benefits of doctoral studies, work in industry, academic community, recognition of young professionals*

# Iskustva pri izradi doktorskog rada “Standardizirana struktura informacijskoga modela gradnje prilagođena planiranju resursa u izvođačkom poduzeću”

dr. sc. **Sonja Kolaric**

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

## Sažetak

U doktorskome radu istraživao se problem nepostojanja standardiziranog seta informacija koji bi omogućavao planiranje resursa kod primjene informacijskog modeliranja gradnje (engl. Building Information Modeling – BIM). Znanstveni doprinos rada predstavlja razvijena struktura informacijskoga modela gradnje koju izvođačka poduzeća mogu koristiti za primjenu BIM normi ISO 19650 i ISO 29481, a da pritom ne mijenjaju dosadašnje procese planiranja resursa poduzeća. Za izradu doktorske disertacije bilo je nužno stjecanje znanja iz modeliranja poslovnih procesa te programiranja.

*Ključne riječi: informacijsko modeliranje gradnje; planiranje resursa; modeliranje poslovnih procesa; standardizirani set informacija; izvođačka poduzeća*

## **Experience in preparing a doctoral dissertation Standardized structure of Building Information Model for Enterprise Resources Planning in contractor construction companies**

### **Abstract**

The doctoral dissertation investigated the problem of the lack of a standardized set of information within the Building Information Modelling (BIM) environment that would enable resource planning. The scientific contribution of the paper is a structure of the building information model that contractors can use to apply BIM standards ISO 19650 and ISO 29481, without changing the current processes of enterprise resource planning. For the preparation of the doctoral dissertation, it was necessary to acquire knowledge in business process modelling and programming.

*Key words: Building Information Modelling; resources planning; business process modelling; standardized dataset; contractor construction companies*



**SAŽECI OBRANJENIH  
DOKTORSKIH RADOVA**  
rujan 2021. - srpanj 2022.

## Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju rujan 2021. – srpanj 2022.

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
<b>2021. godina</b>	
Standardizirana struktura informacijskoga modela gradnje prilagođena planiranju resursa u izvođačkom poduzeću dr. sc. Sonja Kolarić	271
Razvoj metodologije za primjenu pepela drvene biomase u betonu dr. sc. Karmen Kostanić Jurić	272
<b>2022. godina</b>	
Prodor klorida i korozija armature u alkalno-aktiviranim materijalima dr. sc. Antonino Runci	273
Modeliranje odstupanja procijenjenih od ostvarenih troškova gradnje cestovnih projekata dr. sc. Marijo Lovrinčević	274
Posmik u armiranom betonu: analiza i unaprjeđenje postojećih mehaničkih modela na temelju novoga pristupa eksperimentalnom istraživanju dr. sc. Janko Koščak	275
Povećanje učinkovitosti iteracijske primjene metode gustoća sila dr. sc. Elizabeta Šamec	276
Duktilnost betonskih greda s FRP armaturom i ovijenim tlačnim područjem dr. sc. Tvrtko Renić	277

## **dr. sc. Sonja Kolarić**

### **Životopis**

Sonja Kolarić rođena je 1991. u Čakovcu. Diplomirala je 2015. na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je 2021. i obranila disertaciju. Akademске godine 2013./2014. dobila je Posebnu Rektorovu nagradu, a akademске godine 2014./2015. dobila je Dekanovu nagradu. Godine 2015. zaposlila se na Građevinskom fakultetu kao asistentica. Objavila je više znanstvenih radova te sudjelovala na konferencijama u Hrvatskoj i inozemstvu.

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

Datum obrane: 29. 9. 2021.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Standardizirana struktura informacijskoga modela gradnje prilagođena planiranju resursa u izvođačkom poduzeću**

### **Sažetak**

U ovom radu istraživao se problem s nepostojanjem standardiziranoga seta informacija koji bi omogućavao analizu i planiranje resursa prilikom primjene informacijskoga modeliranja gradnje (engl. Building Information Modeling – BIM). Na temelju provedenih strukturiranih intervjua, definiran je proces analize potrebe za materijalnim resursima koji je u izvođačkim poduzećima ključan za kreiranje zahtjeva za nabavu i pokretanje nabave materijalnih resursa. Proces je interpretiran u BIM okružje te je razvijena standardizirana struktura informacijskoga modela gradnje, koja definira raščlambu informacija u nekoliko razina: projekt, građevine, etaže, konstruktivni elementi, aktivnosti i resursi. Pritom svaka informacija određene razine mora biti klasificirana korištenjem klasifikacijskoga sustava u skladu s normom ISO 12006-2 te mapirana sa shemom podataka u skladu s normom ISO 16739. Za izradu zahtjeva za nabavu korištenjem informacija iz BIM okružja nužno je korištenje 4D/5D BIM sustava, koji ima razvijeno aplikacijsko programsko sučelje te programskoga dodatka koji omogućuje izvoz informacija o materijalnim resursima iz BIM okružja. U budućim istraživanjima potrebno je analizirati mogućnosti za potpunu implementaciju BIM sustava u izvođačka poduzeća. Znanstveni je doprinos doktorskoga rada u razvijenoj strukturi informacijskoga modela gradnje koju izvođačka poduzeća mogu koristiti za primjenu BIM normi ISO 19650 i ISO 29481, a da pritom ne mijenjaju dosadašnje procese planiranja resursa u ERP sustavu. U radu su definirani i čimbenici za implementaciju razvijene strukture.



## **dr. sc. Karmen Kostanić Jurić**

### **Životopis**

Karmen Kostanić Jurić rođena je 1989. u Splitu. Diplomirala je 2014. na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je 2021. i obranila disertaciju. Dobitnica je stipendije Hrvatske zaklade za znanost na projektu Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC<sup>2</sup> (IP-2016-06-7701). Od 2014. radi u tvrtki Tomting 2010 d.o.o. Stručni ispit za obavljanje poslova prostornoga uređenja i graditeljstva položila je 2016. godine, a 2017. upisana je u Imenik ovlaštenih inženjera građevinarstva te je stekla certifikat voditelja projekata prema IPMA standardu. Godine 2018. položila je stručni ispit za stručnjaka zaštite na radu, te Modul 1 i Modul 2. Kao autorica ili koautorica objavila je više znanstvenih radova te je sudjelovala na konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentor:            prof. dr. sc. **Nina Štirmer**

Datum obrane: 29. 11. 2021.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Razvoj metodologije za primjenu pepela drvene biomase u betonu**

### **Sažetak**

Kako bi se smanjila eksploatacija sirovina za proizvodnju betona, danas najkorištenijega materijala u građevinarstvu, sve se više provode istraživanja zamjenskoga materijala za cement i prirodne agregate. S druge strane, raste udio energije dobivene iz svih obnovljivih izvora pa tako i bioenergije, u kojoj značajan udio čini drvena biomasa, čijim izgaranjem nastaje pepeo. Povezivanjem tih industrija smanjuje se odlaganje pepela drvene biomase (PDB) na odlagalištima te se osigurava dio sirovina za proizvodnju betona, uz smanjenje energetske potrebe i emisije CO<sub>2</sub>. U doktorskome radu prikazan utjecaj primjene PDB-a kao zamjene za 15 % cementa i 15 % pijeska na svojstva betona u svježem stanju, mehanička svojstva i svojstva trajnosti. Izvorni znanstveni doprinos ostvaren je u detaljnoj karakterizaciji 12 lokalno dostupnih PDB-a, i to letećih i krupnih (s dna peći i miješanih). S obzirom na uočenu potrebu da se eliminira ili barem smanji udio nepovoljnih tvari u PDB-u, napravljena je analiza utjecaja prosijavanja i mljevenja na četirima različitim PDB-ima. Pokazano je da u slučaju smanjene reaktivnosti pasta s PDB-om, mljevenje doprinosi svojstvima PDB-a relevantnima za svojstva betonskih kompozita. Prikazan je utjecaj PDB-a kao zamjene za dio cementa i kao zamjene za dio agregata na mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona. Izrađena je prva metodologija za primjenu PDB-a u betonu koja povezuje ograničenja postojećih normi za zamjenske materijale za cement i reciklirane agregate s rezultatima eksperimentalnoga rada prikazanoga u disertaciji.

## dr. sc. Antonino Runci

### Životopis

Antonino Runci rođen je 1995. u Messini, Italija. Srednju školu Liceo Classico F. Maurolico (Messina, Italija) završio je 2013. godine. Godine 2016. završio je diplomski studij Analiza i upravljanje prirodnim i antropskim rizicima (geološke znanosti) na Sveučilištu u Messini (Italija). U rujnu 2018. završio je magisterij iz geologije i tehničke geologije na Sveučilištu u Padovi (Italija) s istraživačkom temom "Formuliranje alkalno aktiviranih veziva od troske visokih peći: sustavi na bazi silikata i aluminata" pod mentorstvom prof. G. Artioli i dr. M. Bellotto. Od 1. travnja 2019. do završetka doktorskoga studija, radio je kao doktorand na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentori: doc. dr. sc. **Marijana Serdar**  
prof. dr. sc. **John Provis**

Datum obrane: 1. 6. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## Prodor klorida i korozija armature u alkalno-aktiviranim materijalima

### Sažetak

Alternativna veziva sa smanjenom emisijom CO<sub>2</sub> i valorizacijom otpada trebaju postići tehničke karakteristike usporedive s portlandskim cementom kako bi bili dovoljno konkurentni. Alkalno-aktivirani materijali pokazali su veliku konkurentnost, ali znanje o dugotrajnoj otpornosti na prodor klorida i koroziju čelika nije dovoljno da jamči konkurentan uporabni vijek. Prodor klorida u beton glavni je uzrok rane korozije armiranoga betona. Nakupljanje kloridnih iona na sučeljku čelik-beton uzrokuje pucanje zaštitnog pasivnog filma na površini čelika i taloženje produkata korozije, što uzrokuje pucanje betona zbog većeg volumena produkata korozije. Na stabilnost pasivnog filma i na parametre koji utječu na difuziju klorida izravno utječu produkti reakcije, kemijski sastav porne otopine i mikrostruktura matrice. Velike razlike u reakcijskim mehanizmima i produktima ne dopuštaju izravan prijenos raspoloživog znanja o mehanizmima degradacije s portlandskog cementa na alkalno-aktivirane materijale. Ovaj se rad bavi problematikom prodora klorida i posljedica korozije armature u AAM-ima iz različitih kutova. Prvo, projektiranje mješavine provedeno je imajući u vidu zahtjeve za velikim uporabnim svojstvima. Drugo, utvrđena je povezanost između kemijskog sastava i mikrostrukturnih svojstava alkalno-aktiviranog morta i koeficijenta difuzije klorida, koristeći osnovnu normu razvijenu za portlandski cement i napredne mikrostrukturne metode.

## **dr. sc. Marijo Lovrinčević**

### **Životopis**

Marijo Lovrinčević rođen je 1967. u Splitu gdje je završio osnovnu i srednju školu. Građevinski fakultet u Splitu, opći smjer upisao je akademske godine 1987./1988., a 1994./1995. nastavlja studij Građevinskom fakultetu u Zagrebu, usmjerenje Konstrukcije, gdje je diplomirao 1997. godine. Odlikovan je medaljom "Oluja". Od 1997. do 1998. bio je zaposlen u građevinskom poduzeću Lavčević u Splitu na poslovima pomoćnika glavnog inženjera gradilišta, a zatim i u projektnom uredu kao suradnik projektanta. Od 1998. do 2005. bio je zaposlen u tvrtki Projektni biro - Konstruktor u Splitu kao ovlaštenu inženjer građevinarstva, projektant stambenih objekata i objekata cestovne infrastrukture. Prvu polovicu 2005. godine radio je u Hrvatskim autocestama d.o.o. na poslovima glavnog inženjera. Nakon toga do polovice 2006. preuzima ulogu člana poglavarstva Grada Splita gdje je bio zadužen za izgradnju i održavanje komunalne infrastrukture. Od srpnja 2006. do studenog 2009. godine radio je kao član uprave Hrvatskih autocesta d.o.o. zadužen za izgradnju i održavanje mreže autocesta u RH. Od 2009. zaposlen je u obiteljskoj tvrtki Ariozo d.o.o.

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

Datum obrane: 13. 7. 2022.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Standardizirana struktura informacijskoga modela gradnje prilagođena planiranju resursa u izvođačkom poduzeću**

### **Sažetak**

Ulaganja u infrastrukturu imaju snažan utjecaj na ekonomiju i gospodarstvo države, aktiviraju značajna financijska sredstva i izazivaju zainteresiranost brojnih dionika. To u prvi plan stavlja važnost točne procjene troškova i činjenicu da mnoge infrastrukturne projekte prati prekoračenje troškova. Radi se o globalnom fenomenu koji ne poznaje zemljopisna ograničenja. Istraživanje značajki prekoračenja na pojedinim geografskim područjima i vrstama infrastrukturnih projekata doprinosi pojašnjenju razloga prekoračenja i poboljšanju procjena troškova budućih projekata. U tu svrhu se istražuju podaci hrvatske cestovne infrastrukture najvišeg ranga. Glavna hipoteza istraživanja je da je analizirajući realizirane troškove moguće modelirati optimističnu pristranost pri procjeni troškova cestovnih projekata i pospješiti točniju procjenu troškova budućih projekata iz iste klase. Formirana je baza podataka, raspona i uzroka prekoračenja za izračun optimistične pristranosti kao početan doprinos daljnjem razvoju sve realnije procjene pristranosti. Dan je prijedlog smjernica za izradu metodologije za izračun optimistične pristranosti pri procjeni troškova projekata primjenom referentne klase projekata. Prezentirani su razlozi prekoračenja troškova, elementi i metode procjenjivanja troškova, kao i načini poboljšanja organizacijskih okvira upravljanja. Predložena je metoda procjene troškova za program ili portfelj projekata korištenjem faktora uvećanja procijenjenih troškova koja će producirati manja odstupanja od ostvarenih troškova građenja nego kada se na koristi taj faktor.

## dr. sc. Janko Koščak

### Životopis

Janko Koščak rođen je 1989. godine u Varaždinu. Godine 2008. upisuje preddiplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Kao student, višestruko je nagrađivan od fakulteta za svoja postignuća, a bio je i stipendist Sveučilišta u Zagrebu. U 2012. godini nagrađen je i Rektorovom nagradom. Diplomirao je 2013. godine završivši diplomski studij, usmjerenje Teorija i modeliranje konstrukcija. Od listopada 2016. do danas radi kao asistent na Zavodu za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Trenutno je uključen u 4 projekta financiranih od Hrvatske zaklade za znanost i Europskog fonda za regionalni razvoj. Do danas, kao autor i koautor objavio je pet članaka u znanstvenim časopisima i više od 15 članaka na znanstvenim simpozijima.

Mentor: izv. prof. dr. sc. **Domagoj Damjanović**

Datum obrane: 14. 7. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## **Posmik u armiranom betonu: analiza i unaprjeđenje postojećih mehaničkih modela na temelju novog pristupa eksperimentalnom istraživanju**

### Sažetak

Disertacija prikazuje ocjenu posmične nosivosti armiranobetonskih elemenata uspoređujući teorijsku pozadinu s rezultatima eksperimentalnog istraživanja. U znanstvenoj je zajednici dobro poznato kako nekoliko različitih mehanizama prijenosa posmika doprinosi posmičnoj nosivosti. Međutim, još uvijek traje rasprava vezana uz kinematiku kritične posmične pukotine koja utječe na omjer doprinosa tih mehanizama. U ovom su istraživanju ispitane 32 armiranobetonske grede s posmičnom armaturom i bez nje te je njihova posmična nosivost uspoređena s procjenom nosivosti na osnovi postojećih propisa i mehaničkih modela. Propagacija kritične posmične pukotine praćena je koristeći 3D stereo fotogrametrijska mjerenja. Kako bi bila moguća analiza kinematike pukotine, njezin je oblik idealiziran grupom pravaca s novo predloženom razinom aproksimacije. Na osnovi stereo fotogrametrijskih mjerenja s frekvencijom uzorkovanja od 25 Hz te koristeći dostupne fizikalne modele, napravljena je detaljna analiza različitih mehanizama prijenosa posmika za 24 ispitane grede, s naglaskom na doprinos uklještenja agregata. Usporedbom eksperimentalno dobivenih rezultata s izračunatim doprinosima pojedinog mehanizma na ukupnu posmičnu nosivost, vidljivo je dobro podudaranje. Međutim, mjerenja su pokazala da većina dostupnih fizikalnih modela za uklještenje agregata precjenjuju normalna i posmična naprezanja koja se javljaju duž kritične posmične pukotine. Dakle, odabirom prikladne metode za prikupljanje i analizu podataka, beskontaktna mjerenja pokazala su se vrlo korisnim za detaljno praćenje oblika i kinematike posmične pukotine.

## dr. sc. Elizabeta Šamec

### Životopis

Elizabeta Šamec rođena je 1991. g. u Varaždinu, gdje završava osnovnu i srednju školu. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisuje 2009. godine. Diplomirala je 2014. g. završivši diplomski studij, usmjerenje Teorija i modeliranje konstrukcija. Od veljače 2015. do veljače 2016. godine bila je zaposlena kao viši stručni suradnik u Gradskom uredu za prostorno uređenje, izgradnju grada, graditeljstvo, komunalne poslove i promet grada Zagreba. Istodobno sudjeluje u izvođenju nastave na Građevinskom fakultetu kao vanjski suradnik na kolegijima Građevna statika 1 i Građevna statika 2. Od svibnja do studenog 2016. godine radila je u građevinskom uredu Aksijal. U prosincu 2016. godine zaposlila se kao asistentica na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za tehničku mehaniku gdje sudjeluje u nastavnim, znanstvenim i stručnim poslovima. U nastavi sudjeluje u pripremi i izvođenju vježbi na kolegijima preddiplomskoga studija Građevna statika 1 i Građevna statika 2. Od rujna 2017. članica je radne grupe Membranske konstrukcije Europskog odbora za normizaciju te tehničkog odbora Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije u Hrvatskom zavodu za norme. Objavila je niz znanstvenih i stručnih radova, a dodatno se usavršavala na Institute for Shell and Membrane Technologies te na ETH Zurich.

Mentor: prof. dr. sc. **Krešimir Fresl**

Datum obrane: 15. 7. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## Povećanje učinkovitosti iteracijske primjene metode gustoća sila

### Sažetak

Svrha ovoga rada unaprijediti je postojeći algoritam iteracijske primjene metode gustoća sila, izvorno korišten za proračun i ocjenu stanja sila u prednapetim vlačnim konstrukcijama. Pronalazak oblika s dodatnim ograničenjima dovodi do nelinearnoga sustava jednačbi i posljedično do problema s konvergencijom, naročito kod velikih primjera bližih praksi. Linearizacija problema moguća je iteracijskom primjenom linearne metode gustoća sila. Rezultati analize i usporedbe vremena izvršenja između linearnoga i nelinearnoga pristupa potvrdili su kako isključivo daljnji razvoj linearne inačice može dovesti do brzoga i robusnoga algoritma. Poboljšanje ima dva glavna cilja: ubrzati proračun za uspješnu implementaciju u interaktivni alat za pronalazak oblika prostornih rešetkastih konstrukcija i omogućiti učinkovitiji utjecaj korisnika na izgled konačnoga rješenja. Smanjenje broja iteracijskih koraka, a time i vremena izvođenja postiže se optimiziranjem točnosti rješavanja sustava linearnih jednačbi u svakom iteracijskom koraku. Dodatna ušteda vremena istražuje se implementacijom novoga postupka rješavanja – iterirane Ritzove metode u prošireni algoritam. Osim ubrzavanja metode, rad se također usredotočuje na mogućnosti zadavanja nerastegnutih duljina elemenata, uz ograničenja sila i duljina iz početne inačice algoritma. Na taj način algoritam korisniku pruža više mogućnosti kontrole konačne geometrije konstrukcije. Kako bi se odgovorilo na postojeću potrebu za razvojem računalnih alata koji omogućuju interaktivno, vizualno podržano istraživanje oblika uz zadavanje dodatnih ograničenja te kako bi se kontekstualizirao rad na poboljšanju algoritma, razvijen je digitalni alat FALCON. Cilj novoga alata podržati je korisnika u kreativnom i aktivnom projektiranju prostornih rešetkastih konstrukcija u ranoj fazi konceptualnoga dizajna.

## dr. sc. Tvrтко Renić

### Životopis

Tvrтко Renić rođen je 1992. godine u Bjelovaru, gdje je završio osnovnu i srednju školu. Od 2011. do 2016. godine studirao je na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Od 2017. godine zaposlen je na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, na Zavodu za konstrukcije, Katedri za betonske i zidane konstrukcije kao asistent. Aktivno sudjeluje u nastavnom, znanstvenom i stručnom poslu zavoda. U znanstvenom radu sudjelovao je na konferencijama i znanstvenim projektima te je autor šest znanstvenih radova u časopisima i 14 radova na skupovima. Sudjeluje na projektu ARES financiranom od Hrvatske zaklade za znanost. Sudjelovao je u pregledima zgrada nakon potresa 2020. godine u Zagrebu i Petrinji i izradi poglavlja “Metode pojačanja ziđa” u knjizi Potresno inženjerstvo – Obnova zidanih zgrada.

Mentor: prof. dr. sc. **Tomislav Kišiček**

Datum obrane: 15. 7. 2022.

### Naslov doktorskog rada

## Duktilnost betonskih greda s FRP armaturom i ovijenim tlačnim područjem

### Sažetak

FRP armatura predstavlja prikladnu zamjenu za čeličnu armaturu, posebno u elementima i konstrukcijama osjetljivim na probleme trajnosti. Najveći nedostatak FRP-om armiranih betonskih elemenata nedostatak je duktilnosti koji proizlazi iz linearno elastičnog ponašanja FRP-a do sloma. Duktilnost predstavlja jedno od najvažnijih svojstava konstrukcija jer nagovještava slom i omogućuje sigurno korištenje konstrukcije. Duktilnost je uz nosivost i krutost važno svojstvo elemenata koje utječe na ponašanje konstrukcija izloženih potresnom djelovanju. U ovom radu je istražena mogućnost ostvarivanja duktilnosti FRP-om armiranih betonskih greda ovijanjem tlačnog područja čeličnim sponama. Za potrebe rada provedena je teorijska analiza primjenjujući uobičajena pravila za čelikom armirane elemente, ali razmatrajući pojedinosti FRP materijala. Nakon teorijske analize provedena su eksperimentalna ispitivanja. Ukupno je ispitano 12 greda, od kojih su tri armirane čeličnom, a devet FRP vlačnom armaturom. FRP-om armirane grede oblikovane su u tri različite skupine, kojima odgovaraju različite razine ovijanja. Ispitivanja su provedena statičkim opterećivanjem greda do sloma. Ispitivanjima se pokazalo da se ovijanjem tlačnog područja FRP-om armiranih greda može značajno povećati njihova duktilnost i nosivost, ali i to da to povećanje nije linearno povezano s ostvarenim pritiskom ovijanja. Znanstveni doprinos je eksperimentalno ispitivanje greda s ovijenim tlačnim područjem i proširivanje teorijskih modela za procjenu njihovog ponašanja.

DOI: 10.5592/C0/PhDSym.2022

ISBN 978-953-8168-60-4

