

# 10. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet  
12. rujna 2024.

## Zbornik radova

urednica  
ANA BARIČEVIĆ



**Izdavač**

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

**Urednica**

izv. prof. dr. sc. Ana Baričević

**Dizajn naslovnice**

minimum d.o.o.

**Prijelom**

Tanja Vrančić

**Tisak**

Tiskara Zelina d.d., 2024.

**Naklada**

100 kom.

**ISSN**

ISSN 2991-4892 (Online)

**DOI**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2024>

Zagreb, rujan 2024.

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

# 10. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

12. rujna 2024., Zagreb

Zbornik radova

Urednica

**Ana Baričević**

## Organizacijski odbor simpozija

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



## Predgovor

Već desetu godinu zaredom, Simpozij doktorskog studija Građevinarstvo okuplja doktorande i njihove mentore, služeći kao platforma za stjecanje iskustva u ranim istraživačkim danima. Utemeljen 2015. godine s misijom podrške razvoju istraživačkog rada, usvaja znanstvene metodologije i kritičkog mišljenja među doktorandima, Simpozij je danas nezaobilazan događaj u akademskom kalendaru Građevinskog fakulteta. Tijekom godina, održano je više od 150 predavanja koja su doktorandima pružila dragocjeno iskustvo u početku njihovih istraživačkih karijera.

I ove godine, Simpozij je posvećen mobilnosti mladih istraživača. Programi mobilnosti omogućavaju mladim istraživačima da istražuju u različitim akademskim sredinama, proširujući svoje perspektive i doprinos lokalnim i globalnim istraživačkim zajednicama. Mogućnosti koje pružaju programi Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ) predstaviti će upravitelj zaklade, prof. dr. sc. Ozren Polašek, naglašavajući važnost financijske podrške HRZZ programa za ostvarivanje mobilnosti mladih znanstvenika. Ivan Makovec prikazat će mogućnosti prijave i realizacije mobilnosti mladih istraživača putem programa Agencije za mobilnost i programe Europske unije (AMPEU), ističući prednosti i izazove koje donose ovi programi. Ova predavanja pružit će doktorandima vrijedne informacije kako bi ih potaknula na korištenje prilika za njihov osobni i profesionalni razvoj.

Oba predavanja pratit će prezentacije uspješnih prijava mladih istraživača Fakulteta. Iskustva odlazne mobilnosti asistencijom prenijet će Antonela Moretić i Karlo Ožić, koji su sredstva osigurali putem programa mobilnosti Hrvatske zaklade za znanost – odlazna mobilnost asistencijom. Dr. sc. Suzana Ereiz svojim pozitivnim primjerom motivirat će ostale mlade istraživače za prijavu MSCA postdoktorske stipendije. Njezina prijava na navedeni natječaj tijekom 2023. godine pozitivno je ocijenjena te će sljedeće dvije godine svoja istraživanja provoditi na Politecnico di Milano. Za mlade istraživače od velikog je značaja čuti iz prve ruke iskustva i izazove ovog iznimno kompetitivnog natječaja te ovim putem dr. sc. Ereiz još jednom iskreno čestitamo na ostvarenome uspjehu. Doprinos diskusiji dati će i djelatnici koji su dodatno obrazovanje i usavršavanje ostvarili sredstvima Građevinskog fakulteta, kojima se svake godine posebno potiče mlade istraživače na odlazak na partnerske institucije.

Nadalje, ove godine imat ćemo priliku slušati izlaganja 13 doktoranada koji će predstaviti teme svojih doktorskih radova. Iznimno zanimljivi radovi dio su ovog zbornika i potvrda inovativnih, održivih i relevantnih istraživanja koja se najvećim dijelom provode u sklopu brojnih kompetitivnih istraživačkih projekata Fakulteta.

Ovim putem zahvaljujem svima koji su pomogli u organizaciji 10. Simpozija doktorskog studija Građevinarstvo i time doprinijeli njegovom uspjehu.

Zagreb, kolovoz 2023.

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



# Sadržaj

Predgovor .....	5
Razvoj postupaka za mjerenje pomaka nasipa pomoću bespilotnih sustava Marijan Car, Meho Saša Kovačević .....	9
Jednoosna tlačna i nedrenirana posmična čvrstoća tla Doria Baletić, Danijela Jurić Kačunić .....	17
Određivanje potencijala likvefakcije pomoću statičkog penetracijskog pokusa Kristina Vulić, Lovorka Librić .....	25
Važnost dugotrajnog monitoringa zemljanih brana Goran Grget, Mario Bačić .....	35
Sustav za potporu u odlučivanju za upravljanje rizicima u infrastrukturnim projektima Ladislav Bevanda, Anita Cerić .....	45
Utjecaj rizika klimatskih promjena na zgrade sa statusom kulturnog dobra Petra Vučetić Osonjački, Anita Cerić .....	53
Istraživački okvir za odabir lokacija evakuacijskih skloništa kod prirodnih katastrofa Bojan Ožinger, Ivica Završki .....	61
Primjena neuralnih mreža za predviđanje strukturalnog ponašanja kolničke konstrukcije uslijed djelovanja prometnog opterećenja Ana Rudeš, Tatjana Rukavina .....	71
Carbon curing of concrete: process overview and concrete properties Valentina Mustapić, Marijana Serdar .....	81
Proračun duktilnosti proizvoljnih armiranobetonskih presjeka opterećenih uzdužnom silom i momentom savijanj Hrvoje Čagalj, Mario Uroš .....	91
Savijanje betonskih stupova armiranih FRP šipkama Igor Džajić, Domagoj Damjanović .....	105
Optimizacija oblika tensegrity sistema Ivan Franić, Petra Gidak .....	121
Seizmičko ponašanje inovativnih priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija Ozren Sudić, Davor Skejić .....	133
Izvešća o provedenom dodatnom obrazovanju i usavršavanju zaposlenika .....	143
Sažeci obranjenih doktorskih radova: rujn 2023. - srpanj 2024 .....	151



# Razvoj postupaka za mjerenje pomaka nasipa pomoću bespilotnih sustava

**Marijan Car**<sup>1</sup>, prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević**<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

## Sažetak

Geotehnička mjerenja deformacija infrastrukturnih nasipa, ključnih za sigurnost prometa, suočavaju se s izazovima zbog visokih troškova i vremenske zahtjevnosti. U Hrvatskoj, nasipi na mekom tlu doživljavaju velika slijeganja, što zahtijeva redovite sanacije. Uz primjenu standardnih geotehničkih mjernih tehnika, nedovoljno istražen potencijal leži u upotrebi bespilotnih sustava za poboljšanje mjernih metoda, s naglaskom na fotogrametrijsku metodu. Napredak u tehnologiji GNSS-a, INS-a, digitalnih kamera, i mobilnih mjernih senzora omogućuje prilagodbu bespilotnih sustava, otvarajući nove mogućnosti za precizno i efikasno prikupljanje podataka.

*Ključne riječi: nasip, deformacije, mjerenja, bespilotni sustavi*

## Development of methods for measuring displacement of embankments using unmanned aerial systems

### Abstract

Geotechnical measurements of deformations in infrastructural embankments, crucial for traffic safety, face challenges due to high costs and time requirements. In Croatia, embankments on soft soil experience significant settlements, necessitating regular remediation. Along with the application of standard geotechnical measurement techniques, there is an underexplored potential in the use of unmanned aerial systems (UAS) to improve measurement methods, with a focus on photogrammetric techniques. Advances in GNSS technology, INS, digital cameras, and mobile measurement sensors allow for the adaptation of UAS, opening new possibilities for precise and efficient data collection.

*Key words: embankment, deformations, measurements, unmanned systems*

## 1 Uvod

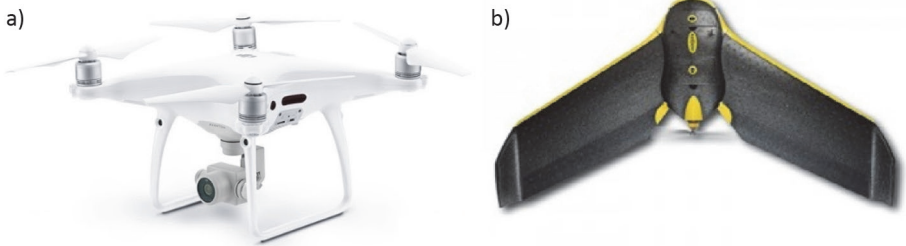
Inženjerski ili prirodni nasipi igraju ključnu ulogu u prometnoj infrastrukturi, a njihove deformacije i nestabilnosti predstavljaju značajan rizik za sigurnost i funkcionalnost prometa. U Hrvatskoj je izgrađeno mnogo infrastrukturnih nasipa na mekom tlu, koji mogu doživjeti slijeganja veća od 30 cm godišnje. Na ovim nasipima redovito se provode sanacijske mjere koje uključuju dodavanje novog materijala, no to dodatno pojačava slijeganja koja će se nastaviti sve dok se ne izvrši sanacija odnosno poboljšanje temeljnog mekog tla [1].

Raznoliki spektar mjernih instrumenata, od jednostavnih do visoko sofisticiranih, razvijen je za geotehnička mjerenja na nasutim konstrukcijama. Najčešće korišteni instrumenti uključuju one za mjerenje pomaka (geodetski instrumenti), naginjanja (klinometri), te uzdužnih i poprečnih deformacija unutar bušotina (inklinometri, ekstenzometri, klizni deformetri, klizni mikrometri), napetosti u tlu (tlačne ćelije, kratki deformetri) i pritiska podzemne vode (piezometri). Svaki od ovih instrumenata karakterizira specifičan opseg mjerenja, točnost, preciznost, rezoluciju, pouzdanost, trajnost i cijenu, što implicira da svaki od njih posjeduje određene prednosti i ograničenja [2].

Geotehnička mjerenja deformacija nasutih građevina, uključujući geodetska mjerenja pomaka putem ugrađenih repera, suočavaju se s ozbiljnim ograničenjem jer se izvode na diskretnim mjestima duž nasipa. S obzirom na visoke troškove i vremensku zahtjevnost, nije izvedivo provesti ta mjerenja na dovoljno velikom broju profila, budući da nasipi mogu biti dugi od nekoliko desetaka metara do desetaka kilometara. U takvim okolnostima, korištenje bespilotnih letjelica ili dronova predstavlja velik, ali još uvijek nedovoljno istražen potencijal za poboljšanje mjernih metoda [3].

## 2 Bespilotni sustavi

Bespilotni sustav (eng. UAS - Unmanned Aerial System) popularnijeg i češće korištenog naziva 'dron' je letjelica ili zrakoplov bez posade, koja se može nadzirati na daljinu pomoću daljinskog upravljača ili letjeti samostalno uporabom unaprijed programiranog plana leta (Jurić-Kačunić-2 i dr. 2015). Dva glavna tipa UAS su "Rotary wing" (slika 1a) i "Fixed wing"(slika 1b) ". Prednosti i nedostaci oba tipa prikazani su tablici 1.



**Slika 1. Tipovi bespilotnih sustava: a) "Rotary wing" i b) "Fixed wing"**

**Tablica 1. Prednosti i nedostaci tipova bespilotnih sustava**

Tip drona	Fix wing	Rotary wing
Projekti	Veća područja	Manja područja, inspekcija
Primjena	Kartiranje, GIS, geodezija, agronomija...	Kartiranje urbanih područja, snimanje zgrada, pregledi objekata
Brzina leta	Visoka	Niska
Obuhvat leta	Veliki	Mali
Rezolucija kartiranja	cm po pikselu	mm po pixelu
Polijetanje / slijetanje	Veliko	Malo
Vrijeme leta i otpor vjetru	Veliko	Malo

Točnost analiza deformacija nasipa uvelike ovisi o kvaliteti i detaljnosti računalnog modela tih nasipa. Fotogrametrijska metoda izmjere, koja se odlikuje visokom točnošću, efikasnošću i stupnjem automatizacije, dugo se koristi za takve zadatke i stoga je često metoda izbora. S pojavom ekonomičnih bespilotnih letjelica opremljenih digitalnim kamerama, fotogrametrijske metode postale su dostupne širem spektru korisnika. Iako ove letjelice pružaju značajan mjerni potencijal, primarno su dizajnirane za rekreativno letenje i snimanje videa i fotografija za osobnu upotrebu, te se obično ne koriste za profesionalna mjerenja.

Da bi se bespilotni sustav mogao koristiti u svrhe prikupljanja podataka i kartiranja njegove najvažnije karakteristike su: rezolucija fotoaparata (senzora), vrijeme leta (autonomija), ugrađena GPS antena, stabilizator fotoaparata i mogućnost obavljanja autonomnog leta. Samo upravljanje letjelicom vrši se pomoću daljinskog upravljača koji na sebi ima pričvršćeno tablet računalo, preko kojeg se vrše postavke samog leta.

Korištenjem niskobudžetnih bespilotnih sustava za snimanje u nizovima i blokovima s adekvatnim uzdužnim i poprečnim preklopom između snimaka, stvara se slikovni materijal koji se zatim obrađuje prema fotogrametrijskim principima. Ovi principi su nadopunjeni algoritmima prilagođenim specifičnostima niskobudžet-

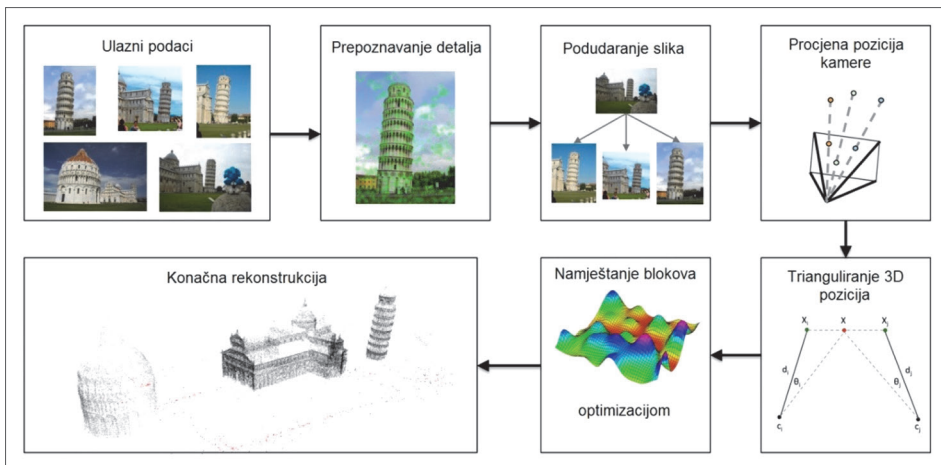
nih bespilotnih letjelica. Mjerenje se izvodi pomoću metode slikovnih korelacija, koja automatski detektira homologne detalje na područjima gdje se snimke preklapaju, omogućujući fotogrametrijsku rekonstrukciju. Konačni produkt je trodimenzionalni računalni model nasipa i njegove okoline, s točnošću i detaljnošću koja je zadovoljavajuća za računalnu analizu deformacija tog nasipa.

Razvoj tehnologija poput GNSS-a (Global Navigation Satellite System), INS-a (Inertial Navigation System), digitalnih kamera i različitih mobilnih mjernih senzora omogućio je prilagodbu bespilotnih sustava s opremom specijaliziranom za različite svrhe. Ovaj napredak opravdava ekonomske i ostale zahtjeve za kvalitetnim prikupljanjem podataka iz zraka [4].

Osnovni zahtjevi koje bespilotne letjelice moraju ispuniti za snimanje terena uključuju sposobnost izvođenja unaprijed definiranog leta, kapacitet za nošenje opreme potrebne za snimanje i navigaciju, autonomiju u letu te sposobnost apsorpcije vibracija i drugih vanjskih utjecaja tijekom leta [5].

### 3 Snimanje trodimenzionalnog modela

Za dobivanje trodimenzionalnog modela terena ili nekog objekta potrebno je snimiti veliki broj fotografija koje se međusobno uzdužno i poprečno preklapaju u cilju povezivanja tih fotografija u jedinstvenu cjelinu te generiranje oblaka točaka (slika 2).

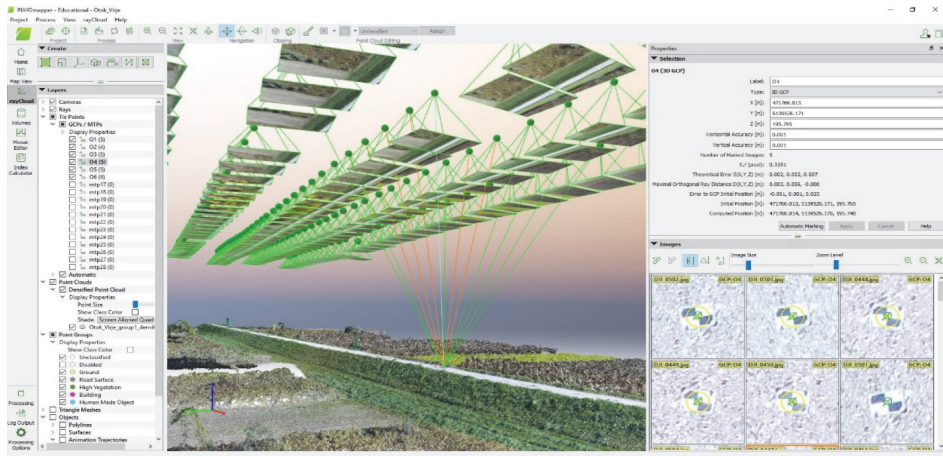


Slika 2. Procedura dobivanja trodimenzionalnog modela [6]

Proces započinje pronalaženjem zajedničkih 2D piksela između snimljenih fotografija [6]. Svaki skup piksela koji se podudara tijekom usporedbe više fotografija omogućuje stvaranje jedne 3D točke u prostoru (slika 3). Povezivanje piksela pro-



vodi se tako da se identificiraju i povežu objekti na paru fotografija, koji se zatim usklađuju s istim objektima na ostalim fotografijama. Na temelju tog modela, koristeći odgovarajući algoritam, generira se oblak točaka.



Slika 3. Podudaranje piksela s različitim fotografija

Slijedi provođenje SfM (Structure from motion) algoritma koji pomoću nizova točaka iz prethodnog koraka, određuje geometriju objekta pronalazeći trodimenzionalne koordinate točaka koje najbolje odgovaraju označenim nizovima [8]. SfM algoritam predstavlja koordinate dobivenih točaka unutar koordinatnog sustava koji se koristi tijekom planiranog leta, a to je obično WGS84 koordinatni sustav. Ovaj sustav, čije je ishodište u centru Zemljine mase, koristi se kao referentni koordinatni sustav za GPS satelite. Iako je ovakav prikaz koristan za vizualizaciju snimljenog područja, za smještaj na kartu ili u službeni koordinatni sustav potrebno je provesti georeferenciranje. To se može ostvariti postavljanjem orijentacijskih točaka na području leta ili upotrebom letjelice opremljene GNSS RTK tehnologijom koja se povezuje s CROPOS sustavom [9].

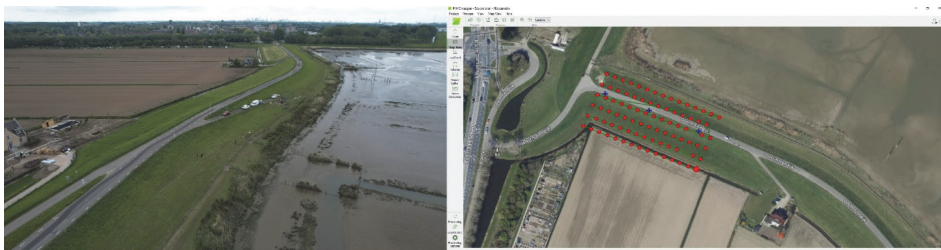
Konačni ishod opisanog postupka je oblak točaka, koji čini skup točaka unutar određenog koordinatnog sustava. U trodimenzionalnom koordinatnom sustavu, te točke su definirane koordinatama X, Y i Z, i obično predstavljaju vanjsku površinu objekta (slika 4).



Slika 4. Oblak točaka definiran koordinatama X, Y i Z

## 4 Primjer primjene bespilotnih sustava

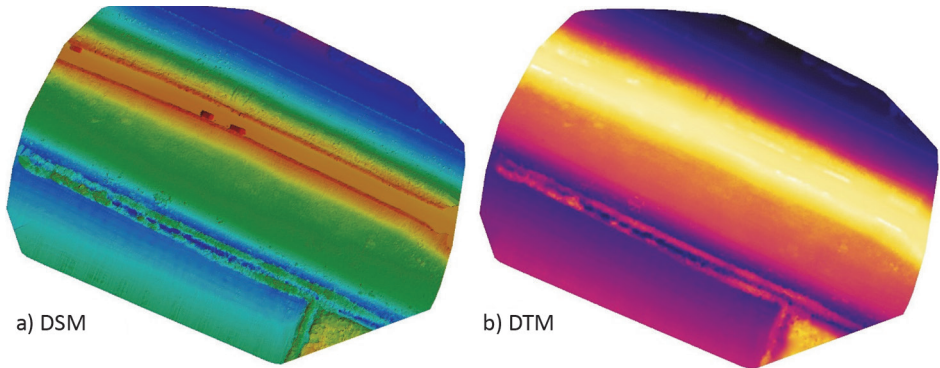
Za potrebe pisanja ovog članka kao primjer prikupljanja podataka primjenom bespilotnih sustava za fotogrametrijsku rekonstrukciju odabran je nasip za obranu od poplava "Oostmolendijk" smješten jugozapadno od Rotterdama u mjestu Ridderkerk, Nizozemska (slika 5).



Slika 5. Nasip "Oostmolendijk"

Prilikom dolaska na lokaciju pripremljena je misija autonomnog (programiranog) leta za određenu dionicu nasipa. Unutar same pripreme definirano je više parametara u koji spadaju visina leta, postotak uzdužnog i poprečnog preklapanja fotografija, brzina leta, nagib kamere i drugih, o kojima će ovisiti buduća fotogrametrijska rekonstrukcija i sama rezolucija oblaka točaka. Za odabranu dionicu prikupljeno je ukupno 90 fotografija koje su prilikom ekspozicije geo-locirane, pokrivajući površinu nasipa i okolice od približno 1Ha. Sami let trajao je približno 10 minuta. Nakon fotogrametrijske obrade prikupljenih fotografija generiran je 3D oblak točka u rezoluciji 8mm/pixel koji se sastoji od ukupno 63 milijuna točaka prosječne gustoće 17 tisuća točaka po m<sup>3</sup>. Za potrebe geotehničkih analiza nasi-

pa na temelju fotogrametrijskog snimanja, odnosno dobivenog 3D oblaka točaka generirano je više izlaznih modela nasipa, kao digitalni model površine (DSM, slika 6a) i digitalni model terena (DTM, slika 6b). Na temelju takvih modela mogu se odrediti poprečni i uzdužni presjeci nasipa u beskonačnom broju profila, precizno izračunati volumen nasipa, odrediti slojnice i slično [10].



Slika 6. a) Digitalni model površine i b) Digitalni model terena

## 5 Zaključak

Geotehnička mjerenja deformacija linijskih objekata kao što su infrastrukturni nasipi imaju značajan nedostatak u činjenici da se ona provode na diskretnim lokacijama odnosno mjernim profilima duž nasipa. U takvim uvjetima primjena bespilotnih letjelica ili dronova ima velike i nedovoljno istražene perspektive. U zadnje vrijeme razvijaju se postupci za mjerenje prostornih deformacija nasipa pomoću bespilotnih letjelica čime se klasični načini diskretnog mjerenja deformacija nasipa (reperi, inklinometri, klinometri, klizni mikrometri) zamjenjuju bržim, jeftinijim i efikasnijim kontinuiranim mjerenjem pomoću bespilotnih sustava. To se postiže sustavnom analizom i interpretacijom svih parametara koji utječu na primjenjivost i ponovljivost mjerenja promjene oblika i volumena nasipa u vremenu, uspoređujući rezultate mjerenja pomoću bespilotnih letjelica s terestričkom fotogrametrijskom izmjerom.

## Literatura

- [1] Jurić-Kačunić, D., Bačić, M., Kovačević, M.S.: Ocjena stanja željezničkih nasipa pomoću georadarskih ispitivanja, Dani prometnica 2015: *Kvaliteta prometne infrastrukture - ključ razvoja gospodarstva*, (ur. Lakušić, S.), Zavod za prometnice, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 171-202, 2015.

- [2] Kovačević, M.S.: The Observational Method and the use of geotechnical measurements, Proc. Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds, *XIII European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, pp. 575-582, 2003.
- [3] Librić, L., Car, M., Kovačević, M.S.: Methods of surveying in rockfall protection, Proceedings of Conference CETRA 2014, *Road and Rail Infrastructure III*, Split, pp. 617-622, 2014.
- [4] Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., Allemand, P.: Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform, *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (2007), pp. 1705–1725.
- [5] Vallet, J, Panissod, F., Strecha, C., Tracol, M. Photogrammetric Performance of an Ultra Light Weight Swinglet "UAV", *UAV-g conference*, Zurich, Switzerland. 2011.
- [6] Erikson, A.: Optimisation in Multiple View Geometry, The L-infinity Way, Queensland University of Technology, 2018.
- [7] Snavely, K.N.: *Scene reconstruction and visualization from internet photo collections*, PhD thesis, 210 p. University of Washington, 2008.
- [8] Westoby, M.J. Brasington, J. Glasser , N.F. Hambrey, M.J. Reynolds, J.M.: 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179 (2012), pp. 300–314.
- [9] Tahar, K.N., Ahmad, A., Akib, W.A.A.W.M., Mohd, W.M.N.W. (2013). Unmanned Aerial Vehicle, Photogrammetric Results Using Different Real Time Kinematic Global Positioning System Approaches, *Developments in Multidimensional Spatial Data Models. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [10] Car, M., Gajski, D., Kovačević, M.S.: Remote surveying of flood protection embankments/15<sup>th</sup> International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering / Bekić, Damir ; Dalibor, Carević ; Vouk, Dražen (ur.). Zagreb: Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia, University of Zagreb Kačićeva 26, Zagreb, 2017. str. 224-232

# Jednoosna tlačna i nedrenirana posmična čvrstoća tla

**Doria Baletić<sup>1</sup>**, prof. dr. sc. **Danijela Jurić Kačunić<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, danijela.juric.kacunic@grad.unizg.hr

## Sažetak

Jednoosna tlačna i nedrenirana posmična čvrstoća tla spadaju u najvažnije parametre tla u geotehničkom inženjerstvu. Određuju se nekonsolidiranim nedreniranim troosnim pokusom i pokusom s padajućim šiljkom. Jednoosna tlačna čvrstoća tla je najveće tlačno naprezanje koje tlo može preuzeti prije sloma, u dreniranim uvjetima, a nedrenirana posmična čvrstoća tla predstavlja najveće posmično naprezanje koje tlo može preuzeti prije sloma u nedreniranim uvjetima. U ovom radu, na primjeru modularne gline prikazani su i uspoređeni rezultati laboratorijskih pokusa kojima se ti parametri određuju prema hrvatskim normama.

*Ključne riječi: nedrenirana čvrstoća, jednoosna tlačna čvrstoća, preša, troosni uređaj, uređaj padajućeg šiljka*

## Uniaxial compressive and undrained shear strength of soil

### Abstract

Uniaxial compressive strength and undrained shear strength are among the most important soil parameters in geotechnical engineering. The unconsolidated undrained triaxial test and the falling cone test determine them. The uniaxial compressive strength of soil is the maximum compressive stress that the soil can withstand before failure in drained conditions. In contrast, the undrained shear strength of the soil represents the maximum shear stress that the soil can withstand before failure in undrained conditions. In this paper, using modular clay as an example, the results of laboratory tests that determine these parameters according to Croatian standards are presented and compared.

*Key words: undrained strength, uniaxial compressive strength, press, triaxial device, fall cone device*

## 1 Uvod

U suvremenom geotehničkom inženjerstvu, razumijevanje svojstava tla, metoda testiranja i interpretacija dobivenih rezultata ima značajnu ulogu kod sigurnog projektiranja i izvedbe zahvata u tlu kao što su temelji zgrada, nasipi, brane, potporne konstrukcije, tuneli i slično. Jedno od ključnih svojstava tla je njegova čvrstoća, koja predstavlja sposobnost tla da preuzme opterećenja bez gubitka nosivosti odnosno sloma. Kad se govori o čvrstoći tla potrebno je razlikovati pojmove jednoosne tlačne i nedrenirane posmične čvrstoće.

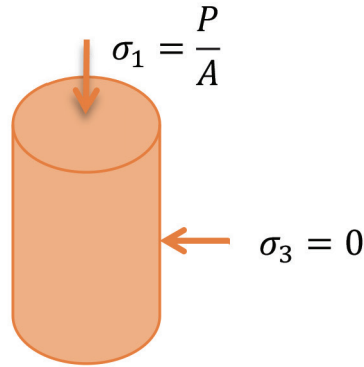
Jednoosna tlačna čvrstoća tla  $q_u$  predstavlja najveće tlačno naprezanje koje tlo može preuzeti prije nego što dođe do sloma, u uvjetima kada se naprezanje nanosi duž jedne osi i kada je omogućeno dreniranje vode iz tla. Primjenjuje se za razumijevanje ponašanja tla u dugotrajnim analizama stabilnosti i nosivosti [1]. Nedrenirana posmična čvrstoća  $c_u$  tla predstavlja najveće posmično naprezanje koje tlo može preuzeti u uvjetima troosnog stanja naprezanja kada drenaža vode iz tla nije dopuštena [2]. Ovakvi uvjeti se pojavljuju prilikom radova u sitnozrnatim tlima zbog nemogućnosti dreniranja vode iz pora. To rezultira povećanjem porednog tlaka i smanjenjem efektivnih naprezanja, što može značajno utjecati na njegovu posmičnu čvrstoću. U krupnozrnatim tlima velike propusnosti, ovi uvjeti su rjeđi. Primjenjuje se za razumijevanje ponašanja tla pri kratkotrajnom ili brzom opterećenju kao što su potresi ili dinamički opterećeni temelji.

Jednoosna tlačna i nedrenirana čvrstoća tla mogu se odrediti terenskim i laboratorijskim pokusima [3,4]. Prema hrvatskim normama, jednoosna tlačna i nedrenirana čvrstoća određuju se u laboratoriju pokusom jednoosnog tlaka, nekonsoolidiranim nedreniranim troosnim pokusom i pokusom s padajućim šiljkom prema. U radu su prikazane osnovne značajke sva tri pokusa. S obzirom na to da se pokus jednoosnog tlaka može provesti u troosnom uređaju nametanjem nultog odnosno minimalnog bočnog tlaka, prikazana je usporedba rezultata ispitivanja gline za modeliranje nekonsoolidiranim nedreniranim troosnim pokusom i pokusom s padajućim šiljkom.

## 2 Pokus jednoosnog tlaka

Pokus jednoosnog tlaka provodi se u uređaju koji omogućuje mjerenje promjene visine cilindričnog uzorka tla zbog nametnute promjene vertikalnog opterećenja. Uzorak tla nalazi se u jednoosnom stanju naprezanja i omogućeno mu je bočno širenje (slika 1).

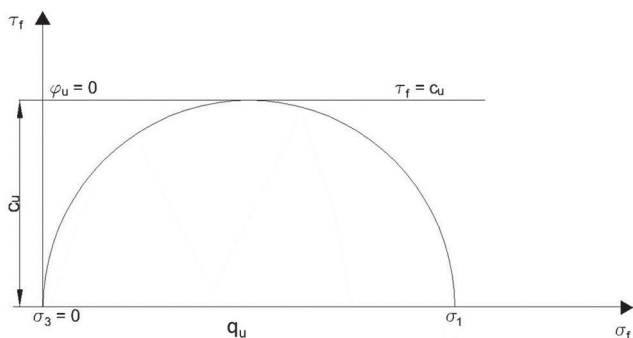




Slika 1. Uređaj za provođenje pokusa jednoosnog tlaka i stanje naprezanja u uzorku

Pokus jednoosnog tlaka provodi se tako što se uzorak tla stavlja između dvije kape koje prenose vertikalnu silu  $P$  na uzorak. Povećanjem vertikalne sile, raste i normalno naprezanje na uzorku, dok istovremeno dolazi do smanjenja njegove visine. U trenutku kada uzorak doseže svoje maksimalno normalno naprezanje koje može podnijeti, dolazi do njegovog sloma. Bitna značajka ovog pokusa je da uzorak nije bočno pridržan, što znači da nema horizontalnih naprezanja. Uzorak se postavlja u jednoosno stanje naprezanja, gdje vertikalno naprezanje predstavlja najveće glavno naprezanje ( $\sigma_1$ ), dok su drugo i treće glavno naprezanje ( $\sigma_2$  i  $\sigma_3$ ) jednaki nuli. Ipak, u realnim uvjetima, savršeno jednoosno stanje naprezanja postiže se uglavnom u središnjem dijelu uzorka. Na gornjoj i donjoj plohi uzorka mogu se pojaviti posmična naprezanja zbog trenja između uzorka i kapa za prijenos opterećenja. To može utjecati na mjerenja i rezultate pokusa, jer su ti posmični učinci izvan idealnog jednoosnog stanja naprezanja [5].

Najveća vrijednost normalnog naprezanja naziva se jednoosna tlačna čvrstoća i označava se sa  $q_u$ . Budući da u pokusu jednoosnog tlaka bočno ili najmanje glavno naprezanje ( $\sigma_3$ ) iznosi nula, moguće je konstruirati samo jednu Mohrovu kružnicu pri slomu uzorka. Promjer ove kružnice jednak je jednoosnoj tlačnoj čvrstoći (slika 2).



**Slika 2. Mohrova kružnica pri slomu uzorka u pokusu jednoosnog tlaka**

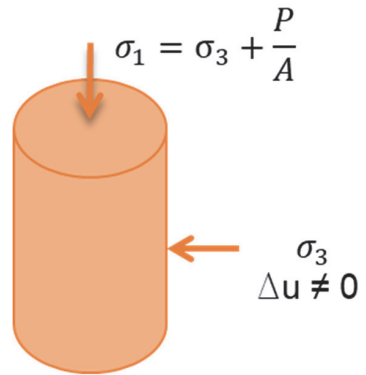
S obzirom na to da je jednoosna tlačna čvrstoća  $q_u$  jednaka promjeru kružnice, a nedrenirana posmična čvrstoća  $c_u$  jednaka radijusu kružnice, ove dvije čvrstoće su povezane izrazom:

$$c_u = \frac{1}{2} q_u \quad (1)$$

### 3 Nekonsolidirani nedrenirani troosni pokus

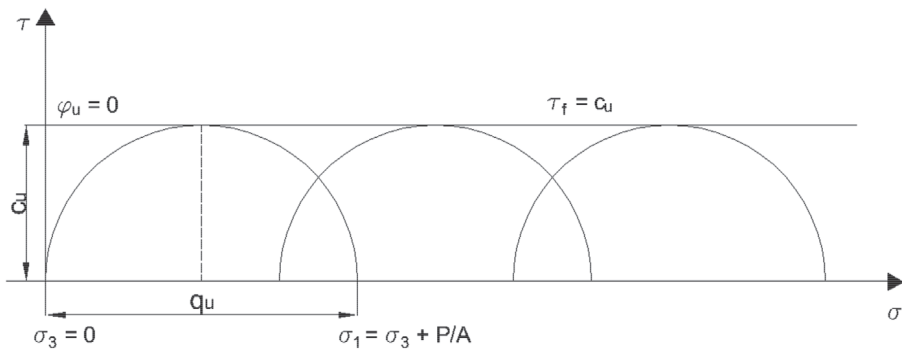
Nekonsolidirani nedrenirani troosni pokus (UU) provodi se u uređaju koji omogućuje mjerenje promjene visine cilindričnog uzorka tla uslijed promjene vertikalnog opterećenja. Uzorak se nalazi u osnosimetričnom stanju naprezanja, a prije nametanja inkremenata vertikalnog opterećenja nije omogućena disipacija porednog tlaka (slika 3). U ovom pokusu, uzorak tla obavijen je gumenom membranom i postavljen na postolje uređaja. Na uzorak se zatim postavlja gornja kapa, a gumeni membrana se hermetički brtvi s postoljem i kapom pomoću O-prstenova kako bi se izolirala od vode koja se nalazi u ćeliji uređaja. Ćelija se nakon toga puni vodom, stvarajući hidrostatski tlak koji djeluje jednako iz svih smjerova (ćelijski tlak  $\sigma_3$ ) na uzorak. Vertikalna sila  $P$  se neovisno povećava nakon primjene hidrostatskog tlaka, čime se inducira slom uzorka. Tijekom cijelog procesa, od nanošenja hidrostatskog tlaka do vertikalnog opterećenja, dreniranje vode iz uzorka nije dopušteno. Također, u ovom pokusu nije moguće mjeriti poredni tlak, što znači da se efektivni parametri čvrstoće tla ne mogu odrediti [5].





Slika 3. Troosni uređaj za provođenje UU pokusa i stanje naprezanja u uzorku

Kada je uzorak tla potpuno zasićen i brzina povećanja sile je dovoljno velika da stvori nedrenirane uvjete, svako povećanje normalnog naprezanja odgovara porastu poreznog tlaka unutar uzorka. U ovakvim okolnostima, efektivno naprezanje se ne mijenja, što znači da nema ni povećanja posmične čvrstoće. Pod takvim uvjetima, kut unutarnjeg trenja  $\phi_u$  jednak nuli, a Coulombova anvelopa Mohrovih kružnica totalnih naprezanja pri slomu uzorka postaje horizontalni pravac koji tangira Mohrove kružnice. Ordinata tog pravca označava nedreniranu posmičnu čvrstoću  $c_u$  (slika 4).



Slika 4. Mohrove kružnice pri slomu uzorka kod UU pokusa

S obzirom na to da je devijatorsko naprezanje pri slomu  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  jednako promjeru kružnice, a nedrenirana posmična čvrstoća  $c_u$  jednaka radijusu kružnice, nedrenirana posmična čvrstoća iznosi:

$$c_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

## 4 Pokus s padajućim šiljkom

Pokus s padajućim šiljkom razvijen je u Skandinaviji za određivanje posmične čvrstoće potpuno poremećenog koherentnog tla [6]. Povezivanjem karakteristika i dubine prodiranja šiljka u uzorak tla Hansbo [7] je zaključio da je nedrenirana posmična čvrstoća tla u  $\text{kN/m}^2$  izravno proporcionalna težini šiljka u  $\text{kN}$  i obrnuto proporcionalna kvadratu dubine prodiranja šiljka u uzorak tla u  $\text{m}^2$ . Kao rezultat istraživanja predložio je izraz za nedreniranu posmičnu čvrstoću  $c_u$ :

$$c_u = c \frac{mg}{i^2} \quad (3)$$

gdje je:

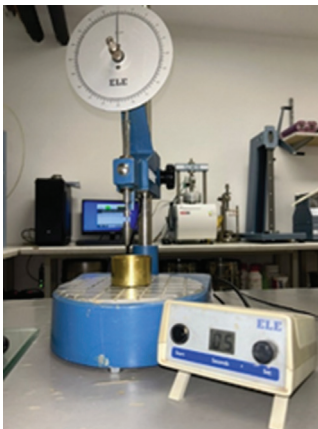
- c - konstanta šiljka
- m - masa šiljka
- g - gravitacijsko ubrzanje
- i - dubina prodiranja šiljka

Konstanta šiljka određuje se eksperimentalnim putem i ovisi o vrsti tla i kutu šiljka kojim se ispituje. U praksi vrijednosti konstante šiljka su:

c = 0.80 za kut šiljka  $30^\circ$

c = 0.27 za kut šiljka  $60^\circ$

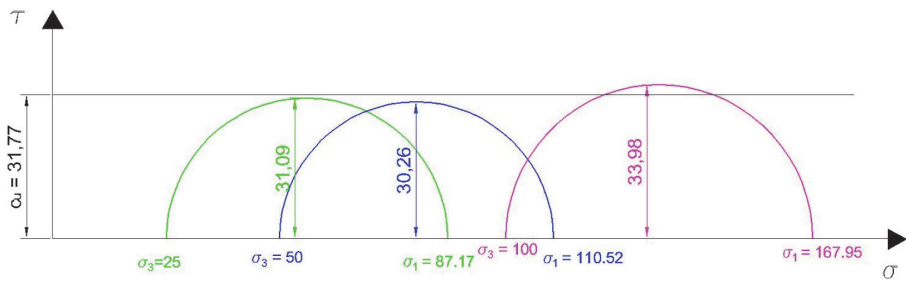
Ispitivanje se provodi uz pomoć Fall cone uređaja prikazanog na slici 5. Ovisno o stanju uzroka koji se ispituje (poremećen ili neporemećen), ispitivanje se provodi ugradnjom u posudu ili ispitivanjem dijela uzorka. Šiljak se postavlja na površinu uzorka te se otpušta. Ispitivanje traje 5 sekundi + 1 sekunda za kontrolu od nagnadnog potonuća šiljka. Očitana vrijednost predstavlja dubinu prodiranja u uzorak.



Slika 5. Fall cone uređaj – pokus s padajućim šiljkom

## 5 Rezultati ispitivanja

Provedeno je određivanje vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće na modularnoj glini provođenjem nekonsolidiranog nedreniranog UU pokusa i pokusa s padajućim šiljkom. U troosnom uređaju provedena su ispitivanja s čelijskim opterećenjima 25 kPa, 50 kPa i 100 kPa. Dobivene su vrijednosti nedrenirane čvrstoće 31.09 kPa, 30.26 kPa i 33.98 kPa. Prije ugradnje u troosni uređaj, na istom uzorku provedeno je ispitivanje padajućim šiljkom. Dobivene su vrijednosti nedrenirane čvrstoće 28.78 kPa, 31.00 kPa i 31.99 kPa. Dobiveni rezultati ispitivanja prikazani Mohrovim kružnicama na slici 6, a usporedba rezultata ispitivanja prikazana je u tablici 1.



Slika 6. Rezultati ispitivanja prikazani Mohrovim kružnicama

Tablica 1. Rezultati ispitivanja nedrenirane čvrstoće

Pokus s padajućim šiljkom [kPa]	UU pokus [kPa]	Odstupanje
28.78	31.09	8 %
31.00	30.26	2 %
31.99	33.98	6 %

## 6 Zaključak

Provedenim ispitivanjima, dobiveni su rezultati iz kojih je bilo moguće odrediti jednoosnu tlačnu i nedreniranu posmičnu čvrstoću tla. Troosnim uređajem i provođenjem UU pokusa, izravno se dobiva vrijednost nedrenirane čvrstoće. Do rezultata se najbrže dolazi korištenjem pokusa s padajućim šiljkom, ali je potrebno je paziti da ne dođe do naknadnog propadanja šiljka. Pogreška se može dogoditi i tijekom odabira konstante šiljka, koja ne mora nužno biti ona najčešće korištena. Navedene metode imaju različite teoretske osnove, postupke ispitivanja i mjerenja podataka zbog čega su odstupanja u rezultatima očekivana i prihvatljiva.

## Literatura

- [1] Lebo, Ž., Bačić, M., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M. S.: *Zagrebačka glina poboljšana raznim vezivima*, GRAĐEVINAR, 73 (2021) 9, pp. 871-880
- [2] Karakan, E. (2023). *Influence of clay mineralogy on undrained shear strength using Fall cone test*, GRAĐEVINAR, 75 (7), 642-652.
- [3] O'Kelly, B.C.: *Fall-cone strength testing of municipal sludges and residues*, Environmental Geotechnics, 5 (2018)1, pp. 18-30.
- [4] Shimobe, S., Spagnoli, G.: *Relationships between undrained shear strength, liquidity index, and water content ratio of clays*, Bull Eng Geol Environ, 79 (2020), pp. 4817–4828.
- [5] Head, K.H.: *Manual of Soil Laboratory Testing. Volume 3, Effective Stress Tests*, Pentech Press, London, 2004.
- [6] Swedish State Railways: *Statens Jarnvagar Geotekniska Meddelanden 2*. Geotechnical Commission of the Swedish State Railways, 1914–1922, final report, 1922.
- [7] Hansbo, S.: *A new approach to determining the shear strength of clay by the fall-cone test*, Proceedings of Royal Swedish Geotechnical Institute, 1957.

# Određivanje potencijala likvefakcije pomoću statičkog penetracijskog pokusa

**Kristina Vulić<sup>1</sup>**, izv. prof. dr. sc. **Lovorka Librić<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, kristina.vulic@grad.unizg.hr*

<sup>2</sup>*Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, lovorka.libric@grad.unizg.hr*

## Sažetak

U prosincu 2020. godine Sisačko-moslavačku županiju pogodio je potres magnitude 6.2 po Richteru. Taj potres uzrokovao je likvefakciju, prirodni fenomen u zasićenim zrnatim tlima, gdje pijesak ispod razine podzemne vode privremeno gubi svoju čvrstoću i ponaša se kao tekućina. Osjetljivost tla na likvefakciju određuje se kroz likvefakcijski potencijal. Rad se fokusira na područje ulica Milana Makanca i Slavka Kolara gdje je došlo do izbacivanja pijeska na površinu, koristeći rezultate statičkog penetracijskog pokusa za određivanje potencijala likvefakcije.

*Gljučne riječi: likvefakcija, CPT, likvefakcijski potencijal, potres*

## Determination of liquefaction potential using a static penetration test

### Abstract

In December 2020, the Sisak-Moslavina County was struck by a 6.2 magnitude earthquake on the Richter scale. This earthquake caused liquefaction, a natural phenomenon in saturated granular soils, where sand below the groundwater level temporarily loses its shear strength and behaves like a liquid. The susceptibility of soil to liquefaction is determined through its liquefaction potential. The paper focuses on the area of Milana Makanca Street and Slavka Kolara Street, where sand was ejected to the surface, using the results of static penetration tests to determine the liquefaction potential.

*Key words: kliquefaction, CPT, liquefaction potential, earthquake*

## 1 Uvod

Na području sisačko-moslavačke županije u prosincu 2020. godine dogodio se potres magnitude 6.2 po Richteru, kojemu su prethodila dva potresa manjih intenziteta od 4.7, odnosno 5.2. Kao posljedica potresa, došlo je do pojave likvefakcije na širem području županije. Likvefakcija, kao proces u tlu, smatra se prirodnim fenomenom koji nastaje u zrnatim materijalima, zasićenim vodom, tijekom udara potresa. Pijesak ispod razine podzemne vode se trenutno i privremeno ponaša kao "gusta tekućina" te gubi svoju posmičnu čvrstoću, a time i sposobnost podupiranja temelja građevina. Kako bi se likvefakcija ostvarila na nekom području potrebno je istodobno ostvarenje dva faktora; materijal mora biti potpuno zasićen vodom i potres odgovarajuće magnitude koji se iskazuje vršnim seizmičkim ubrzanjem. Kako bi se mogla odrediti osjetljivost nekog tla na pojavu likvefakcije definira se likvefakcijski potencijal tla. Općenito se u praksi, prilikom određivanja likvefakcijskog potencijala, koriste empirijski, likvefakcijski dijagrami zasnovani na terenskim korelacijama pojave likvefakcije s rezultatima in-situ pokusa te se isti ažuriraju s vremenom [1]. U ovom radu razmatrat će se područje sisačko-moslavačke županije u kojem se ostvarila likvefakcija, točnije područje ulice Milana Makanca i ulice Slavka Kolara, gdje je došlo do izbacivanja pijeska na površinu tla. U radu će se prikazati određivanje likvefakcijskog potencijala pomoću rezultata statičkog penetracijskog pokusa (CPT).

## 2 Statički penetracijski pokus

Statički penetracijski pokus, CPT, vrlo je jednostavan, vremenski nezahtjevan i ekonomičan pokus, pomoću kojeg se mogu dobiti kontinuirani podaci o tlu po dubini. Izvođenje ispitivanja provodi se na način da se utiskuje posebna sonda u tlo (brzinom od 20 mm/s) istovremeno mjereći otpor utiskivanju na šiljku sonde,  $q_c$ , i trenje po plaštu sonde,  $f_s$ . U slučaju kada je sonda opremljena uređajem za mjerenje tlaka vode, radi se o CPTU ispitivanju, odnosno o statičkom penetracijskom ispitivanju s mjerenjem pornog tlaka. Uz prednosti ispitivanja kao što su brza, kontinuirana, ponovljiva i pouzdana mjerenja te ekonomičnost i dobra teoretska osnova za interpretaciju, postoje nedostaci CPT ispitivanja kao što su ograničenost u šljuncima i cementiranim tlima, zahtjevanje vještih rukovatelja, velika početna ulaganja u opremu te ne dobivanje uzorka tla. Zbog već spomenutih razloga, u geotehnici je učestalo korištenje statičkog penetracijskog pokusa, a osnovna primjena odražava se u određivanju profila tla i identifikaciji slojeva tla, određivanju mehaničkih i fizičkih svojstava tla te parametara tečenja i konsolidacije tla, ali i u pokazivanju osjetljivosti tla na likvefakciju [2]. Zbog svoje ponovljivosti, pouzdanosti i primjena CPT može prevladati probleme kašnjenja koji se često susreću kod bušenja i laboratorijskih ispitivanja tla.

### 3 Potencijal likvefakcije na temelju rezultata CPTU-a

Prilikom određivanja osjetljivosti tla na likvefakciju osnovu čini izračun koeficijenta cikličke otpornosti tla, CRR, kako bi se definirala otpornost tla na cikličko opterećenje, te koeficijent cikličkog naprezanja, CSR. Kada su poznati koeficijenti otpornosti i naprezanja, isti se uspoređuju te u slučaju kada je  $CSR > CRR$  može se zaključiti da je tlo podložno likvefakciji [3].

Na Zavodu za geotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu razvijen je algoritam u programskom jeziku Python za automatsko izračunavanje vjerojatnosti pojave likvefakcije tla [4]. Osim rezultata CPTU ispitivanja, ulazni parametri za proračun su magnituda potresa, maksimalno ubrzanje tla i razina podzemne vode.

Algoritam započinje klasificiranjem tla na temelju CPTU ulaznih podataka i određuje profil uslojenosti tla [5]. Za izračun potencijala likvefakcije, algoritam koristi lokalizirane CPTU korelacije za određivanje kontinuiranog profila zapreminske gustoće tla po dubini [6] i profila postotka sitnih čestica po dubini [7].

Proračun CRR-a i CSR-1 prikazan je u [3]:

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left( \frac{q_{C1Ncs}}{113} + \left( \frac{q_{C1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left( \frac{q_{C1Ncs}}{140} \right)^3 + \left( \frac{q_{C1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right) \quad (1)$$

gdje je  $q_{C1Ncs}$  korigirana otpornost utiskivanju na šljku sonde za čisti pijesak i

$$CSR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \frac{1}{MSF} \frac{1}{K_\sigma} \quad (2)$$

gdje je  $a_{max}$  maksimalno ubrzanje tla,  $r_d$  faktor redukcije naprezanja ovisan o dubini, MSF faktor skaliranja magnitude potresa i  $K_\sigma$  faktor korekcije nadsloja.

Nakon što je definirana ciklička otpornost tla i cikličko naprezanje, može se odrediti faktor sigurnosti tla na likvefakciju kao odnos ta dva parametra:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (3)$$

Prema [8] predložena je klasifikacija tla koja se bazira na probablističkom pristupu obzirom na vjerojatnost pojave likvefakcije i faktoru sigurnosti. Vjerojatnost pojave likvefakcije može se odrediti determinističkim pristupom, a dana je izrazom:

$$PL = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{FS}{A} \right)^B \right]} \quad (4)$$

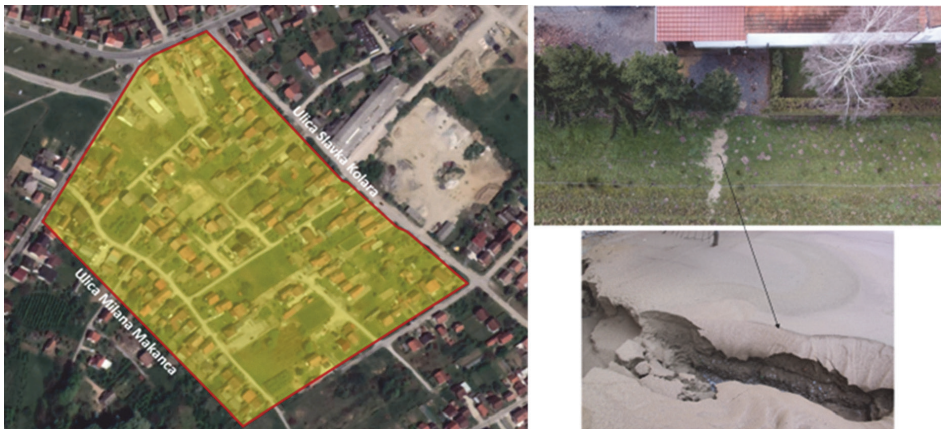
Gdje su  $A = 1.0$  i  $B = 3.3$  odabrani regresijski koeficijenti. Prema [8] dane su klase tla na temelju vjerojatnosti pojave likvefakcije prikazane u tablici 1.

**Tablica 1. Klasifikacija tla prema vjerojatnosti likvefakcije**

Vjerojatnost likvefakcije	Klasa	Opis
$0.85 \leq PL$	5	Gotovo sigurno će tlo likvefirati
$0.65 \leq PL < 0.85$	4	Vrlo je izgledno da će tlo likvefirati
$0.35 \leq PL < 0.65$	3	Likvefakcija / ne-likvefakcija je jednako vjerojatna
$0.15 \leq PL < 0.35$	2	Nije izgledno da će tlo likvefirati
$PL < 0.15$	1	Gotovo sigurno tlo neće likvefirati

#### 4 Primjer ostvarene likvefakcije u području Sisačko-moslavačke županije

Već spomenuti potres iz 2020. godine i svi popratni potresi uzrokovali su brojne štete na infrastrukturi diljem sisačko-moslavačke županije. Na dijelu županije, između ulice Milana Makanca i ulice Slavka Kolara (slika 1. lijevo), na nizu mikrolokacija došlo je do pojave likvefakcije, odnosno uočen je izbačeni pijesak na površini tla što je vidljivo na slici 1 (desno) [9].



**Slika 1. Zona predmetne lokacije (lijevo), primjer pojave likvefakcije na površini (desno) [10]**

Navedene ulice nalaze se u gradu Petrinji, u blizini rijeke Kupe. Od rijeke Kupe ulice su udaljene približno 1.4 km. Aluvij rijeke Kupe sastoji se pretežito od čistog pijeska, a djelomično i od praha ili šljunkovitog pijesaka. Vidljivo je da je riječ o prostoru grada Petrinje koji je naseljen obiteljskim kućama što dodatno naglašava važnost analiziranja likvefakcijskog potencijala lokacije, odnosno definiranja otpornosti na likvefakciju.



Kako bi se mogao odrediti potencijal likvefakcije i sastav temeljnog tla predmetne lokacije, provedeni su geotehnički istražni radovi [2]. Provedena su geotehnička istražna bušenja s kontinuiranim jezgrovanjem, SPT testom i uzimanjem uzoraka, ispitivanja statičkim penetracijskim testom s mjerenjem pornog tlaka (CPTU), laboratorijska ispitivanja uzorka i geofizička ispitivanja, točnije seizmička refrakcija i multikanalna analiza površinskih valova. Ispitivanje statičkim penetracijskim testom s mjerenjem pornog tlaka, CPTU, provedeno je na 10 mjernih mjesta predmetne lokacije dubine od 10 do 14 metara (slika 2).



Slika 2. Pozicije mjernih mjesta istražnih radova na lokaciji Ulica Milana Makanca i ulica Slavka Kolara [9]

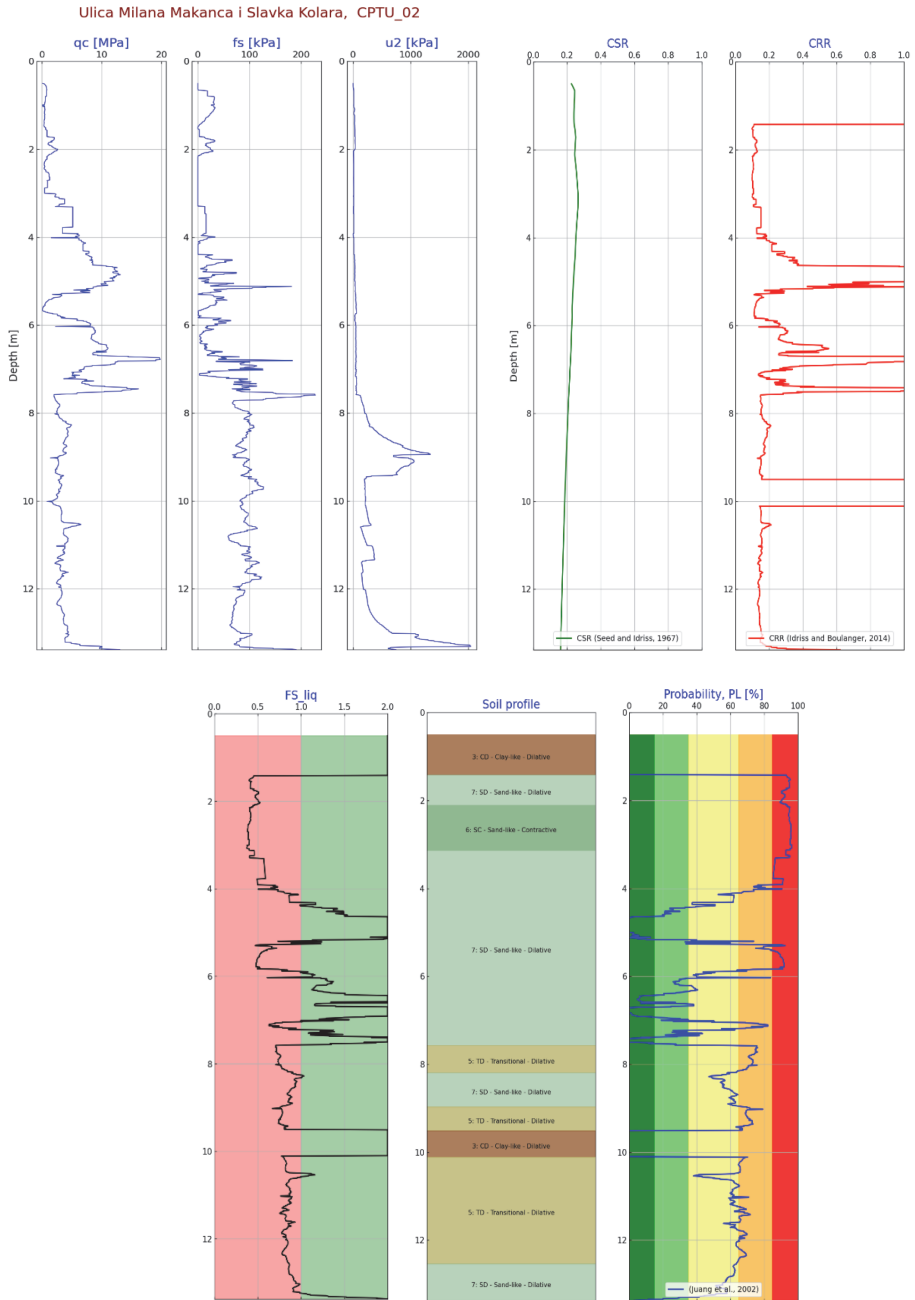
Profil tla se sastoji od izmjene slojeva sitnozrnih i pjeskovitih materijala. Uz navedeno određen je kontinuirani profil zapremine težine po dubini i profil postotka sitnih čestica. Za predmetnu lokaciju proračunate su vrijednosti koeficijenta cikličke otpornosti, CRR, i cikličkog naprezanja, CSR, na temelju odabrane magnitude potresa i horizontalnog ubrzanja tla od 0.15g što odgovara projektnom

ubrzanju tla na razini temeljne stijene predmetne lokacije. Prilikom određivanja navedenih parametara, razina podzemne vode je postavljena na površini terena. Iz tablice 2. je vidljivo kako se za određene potresne uvjete, odnosno za određeno potresno opterećenje koje odgovara 475-godišnjem povratnom periodu predmetne lokacije, bez uzimanja u obzir amplifikacije potresne pobude na putu prema površini terena, može očekivati ponovna pojava likvefakcije i to s izrazito visokom vjerojatnošću.

Na slici 3. su na mjernom mjestu CPTU-02 prikazani izmjereni otpor na šiljku  $q_c$ , trenje na plaštu  $f_s$  i porni tlak  $u_2$ , te izračunati koeficijenti CSR i CRR, profil tla, faktor sigurnosti na likvefakciju i vjerojatnost pojave likvefakcije po dubini. U tablici 2. su za odabrane magnitudo potresa prikazane maksimalne vjerojatnosti pojave likvefakcije i pripadna klasifikacija tla.

**Tablica 2. Rekapitulacija rezultata ocjene likvefakcijskog potencijala za mjerno mjesto CPT-02**

CPTU lokacija	M	$a_g$	max PL [%]	Klasa
CPTU 2	6.0	0.15	95	5
			95	5
			80	4
			70	4
	5.0	0.15	95	5
			95	5
			70	4
			60	3
	4.0	0.15	95	5
			90	5
			60	3
			45	3
			60	3
			45	3



Slika 3. Rezultati CPT ispitivanja i procjene vjerojatnosti pojave likvefakcije na mjernom mjestu CPTU-02

## 5 Zaključak

Ovim radom dan je detaljan uvid u pojednostavljenu metodu određivanja potencijala likvefakcije temeljene na cikličkom naprezanju, u korelaciji sa statičkim penetracijskim pokusom, CPT. Navedena metoda je dugo godina u primjeni, ali se tek nakon potresnog događaja, na području Sisačko-moslavačke županije, pojačala implementacija iste za analizu osjetljivosti tog područja na likvefakciju tla. Procjena osjetljivosti na likvefakciju zahtjeva detaljnu karakterizaciju lokacije kroz provedbu opsežnih geotehničkih laboratorijskih i terenskih istraživanja kako bi se dobio što detaljniji uvid u sastav tla koji igra značajnu ulogu u procjeni likvefakcije. U radu je prikazan primjer likvefakcije na području pogođenom potresom, točnije između Ulice Milana Mikanca i Ulice Slavka Kolara. Zaključeno je kako je to područje podložno ponovnoj pojavi likvefakcije prilikom potresnog djelovanja koje odgovara 475-godišnjem povratnom periodu i to bez razmatranja amplifikacije potresne pobude čime se zaključuje kako neka lokacija pogođena likvefakcijom nije oslobođena od ponovne pojave iste.

## Literatura

- [1] Bačić, M., Ivšić, T., Kovačević, M. S.: Geotehnika kao nezaobilazan segment potresnog inženjerstva, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 10, pp. 923-936
- [2] Librić, L., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M. S.: Primjena rezultata statičkog penetracijskog pokusa za klasifikaciju tla, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 1, pp. 11-20
- [3] Boulanger, R.W., Idriss, I.M.: *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*, No. UCD/CGM-14/01, University of California, Davis, California, 2014.
- [4] Librić, L., Bačić, M. Kovačević, M.S.: Utilization of CPTU for evaluation of liquefaction probability below the flood protection embankment in Croatia, *3rd International Conference on Natural Hazards and Infrastructure*, Athens, 2022.
- [5] Kovačević, M.S., Bačić, M., Librić, L., Žužul, P., Gavin, K., Reale, C.: A novel algorithm for vertical soil layering by utilizing the CPT data, *6th International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2020*, Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2020, pp. 327-334
- [6] Kovačević, M.S., Gavin, K.G., Reale, C., Librić, L.: The use of neural networks to develop CPT correlations for soils in northern Croatia, *4th International Symposium on Cone Penetration testing*, Delft, The Netherlands: CRC Press, 2018. pp. 377-382
- [7] Kovačević, M.S., Gavin, K., Reale, C., Librić, L., Jurić Kačunić, D.: Developing correlations between the soil fines content and CPT results using neural networks, *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019*, Reykjavik 2019.244, 8

- [8] Juang, C.H., Jiang, T., Andrus, R.D: Assessing probability-based methods for liquefaction evaluation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (2002)7, pp. 580-589
- [9] Geotehnički elaborat, GEL-14/2021, Centar građevinskog fakulteta, Zagreb, 2021.



# Važnost dugotrajnog monitoringa zemljanih brana

**Goran Grget<sup>1</sup>**, izv. prof. dr. sc. **Mario Bačić<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Geokon – Zagreb d.d., Goran.Grget@geokon.hr

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

## Sažetak

Kao konstrukcije visokog rizika, s katastrofalnim posljedicama u slučaju prekoračenja graničnih stanja, brane je nužno kontinuirano pratiti kako bi se pravovremeno identificirali potencijalni problemi te pravovremeno poduzele preventivne mjere očuvanja strukturalnog integriteta brana. Ovo je naročito slučaj kod zemljanih brana koje su izrazito osjetljive na sveprisutne promjene klimatskih obrazaca. U radu se daje prikaz tehnika dugotrajnog monitoringa zemljanih brana te se daje sažeti prikaz moguće primjene opreme. Kroz primjer brane Butoniga u Istri, prikazana je važnost dugotrajnog monitoringa kao vitalnog dijela funkcionalnosti i sigurnosti brane. Monitoring brane Butoniga, ukupne visine 23 m i volumena akumulacije od 20 milijuna m<sup>3</sup>, je započeo za vrijeme gradnje 1979. do 1986. godine i nastavio se u eksploataciji sve do danas, pri čemu je sustav monitoringa kontinuirano nadograđivan.

*Ključne riječi: zemljana brana, brana Butoniga, dugotrajni monitoring, pomaci*

## Importance of long-term monitoring of the earth dams

### Abstract

As structures of high risk, with catastrophic consequences in case of exceeding the limit states, dams must be continuously monitored in order to timely identify potential problems and to take preventive measures to preserve the structural integrity of the dams. This is especially the case with earth dams, which are extremely sensitive to ubiquitous changes in climate patterns. The paper describes the techniques of long-term monitoring of earth dams and gives a summary of the possible monitoring equipment used. Through the example of the Butoniga dam in Istria, the importance of long-term monitoring, as a vital part of the dam's functionality and safety, is demonstrated. Monitoring of the Butoniga dam, with a total height of 23 m and a reservoir volume of 20 million m<sup>3</sup>, began during construction from 1979 to 1986 and continued in operation until today, with the monitoring system being continuously upgraded.

*Key words: embankment dam, Butoniga dam, long-term monitoring, displacements*

## 1 Uvod

Brane su građevine za zadržavanje i usmjeravanje vode čime omogućuju kontrolu vodostaja rijeka, sprječavaju poplave, osiguravaju vodu za piće i poljoprivredu te mogu biti dio sustava za proizvodnju električne energije. Prema definiciji Međunarodne komisije za velike brane (ICOLD), velike brane su one koje imaju građevinsku visinu mjerenu od temelja veću od 15 m ili brane visine između 5 i 15 m ako je kapacitet akumulacije veći od 5 milijuna kubnih metara [1]. Prema odredbama za sigurnost brana Svjetske banke [2], u velike brane spadaju još i brane između 10 i 15 m ako imaju složene projektne zahtjeve kao što su npr. neuobičajeni zahtjevi za upravljanje velikim vodama, lokacije u područjima visoke seizmičnosti, složeni uvjeti i zahvati na temeljenju ili zadržavanje toksičnih materijala.

Brane predstavljaju kritične infrastrukturne elemente, sukladno [3], koji imaju važnu ulogu u održivom upravljanju vodenim resursima, ali s obzirom na njihovu važnost spadaju u građevinske konstrukcije koje sa sobom uvijek nose određeni rizik, s katastrofalnim posljedicama u slučaju prekoračenja graničnih stanja. Kao jedna od vrsta brana, zemljane brane su izuzetno osjetljive na klimatske utjecaje. U mnogim dijelovima Europe, pa tako i u Hrvatskoj, klimatski scenariji upućuju na promjenu obrasca padalina, gdje se može očekivati manje padalina [4], ali one će biti intenzivnije uzrokujući brzo opterećenje i povećanje vjerojatnosti sloma. Osim toga, razdoblja intenzivnih oborina slijede nakon dužih sušnih razdoblja. To znači da su zemljane brane pod utjecajem događaja kao što su sušenje i pucanje tla blizu površine tijekom sušnih razdoblja, što omogućuje brzu infiltraciju vode tijekom padalina, smanjenje čvrstoće tla i prekoračenje graničnih stanja. Istodobno, intenzivniji oborinski događaji i povećana erozija tla mogu povećati rizik od erozije brana što može dovesti do osipanja materijala i smanjenja stabilnosti brane.

Stoga, danas je više nego ikada izražena potreba za kontinuiranim praćenjem ponašanja ovih kapitalnih građevinskih konstrukcija tijekom njihove eksploatacije kako bi se pravovremeno identificirali potencijalni problemi te poduzele preventivne mjere očuvanja strukturalnog integriteta, a time spriječile katastrofalne havarije koje bi mogle ugroziti ljudske živote i imovinu. Ovim radom se daje pregledni prikaz mogućih sustava za monitoring zemljanih brana na primjeru dugogodišnjeg monitoringa brane Butoniga u Istri s fokusom na mjerenja pomaka brane. Monitoring je započeo u vrijeme gradnje brane 1979. do 1986. g. i kontinuirano se provodi do danas.

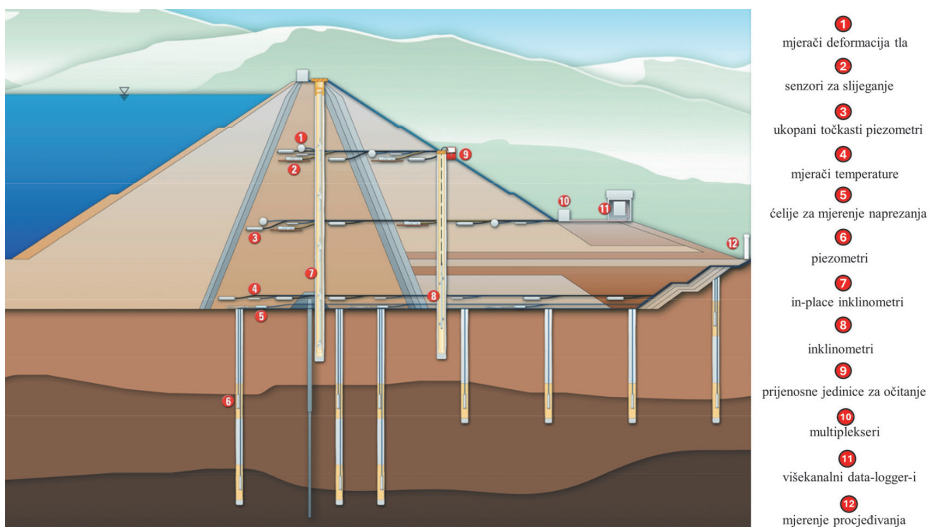


## 2 Monitoring ponašanja zemljanih brana

Mjerenja tijekom izgradnje brane obično se provode kako bi se verificirale projektne pretpostavke, kako bi radna okolina bila sigurna te kako bi se osigurala sigurnost susjednih građevina i okoliša. Nakon izvedbe, zemljana brana se prati kako bi se evaluirale promjene mjerenih parametara kao što su naprezanje, deformacija, pomak, porni tlak, brzina vode, temperatura tla te iste usporedile s projektnim pretpostavkama. Ova usporedba je važna i za određivanje mjera koje treba poduzimati u narednom razdoblju. Tipična oprema za monitoring obuhvaća navedeno u tablici 1, dok je na slici 1 prikazan karakteristični presjek zemljane brane s položajem ugrađene mjerne opreme. Pri tome treba naglasiti da se monitoring provodi u karakterističnim fazama sukladno dinamici danoj projektom ili prema zahtjevu investitora (gradnja, kraj gradnje, punjenje/pražnjenje akumulacije, izvanredni događaji, periodična mjerenja itd.)

Tablica 1. Oprema i ciljevi monitoringa zemljanih brana

Oprema	Cilj monitoringa
Mjerači deformacije tla	Mjerenje deformacija u tijelu brane
Piezometri	Mjerenje tlaka vode u brani i u temeljnom tlu
Mjerači temperature	Mjerenje temperature u tijelu brane
Čelije za mjerenje naprezanja	Mjerenje naprezanja na kontaktu brane i temeljnog tla
Inklinometri	Mjerenje horizontalnog pomaka po dubini brane
Geodetski reperi	Mjerenje prostornog pomaka točke na površini brane
Mjerači procjeđivanja	Mjerenje brzine procjedne vode kroz branu i ispod brane



Slika 1. Karakteristični presjek zemljane brane s položajem opreme za monitoring, modificirano iz [5]

### 3 Primjer dugogodišnjeg monitoringa: brana Butoniga u Istri

#### 3.1 Lokacija i karakteristike brane

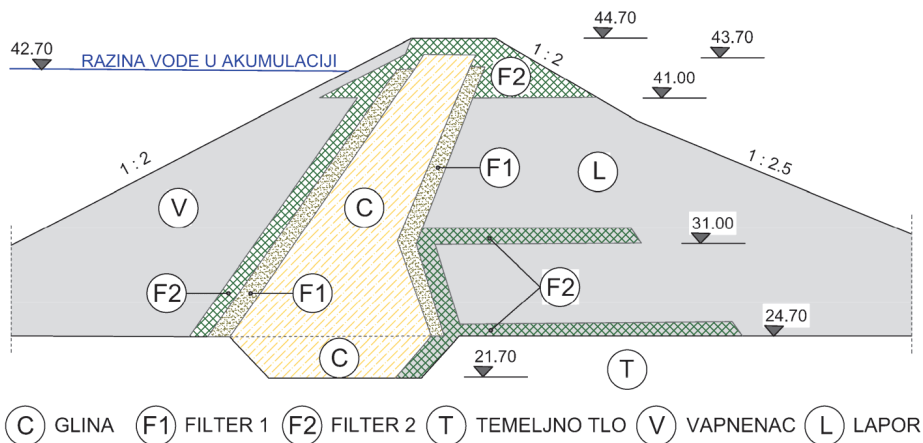
Akumulacija Butoniga se nalazi u središnjem dijelu Istre, slika 2, i višenamjenska je građevina koja služi za zadržavanje visokih voda rijeka Butonige i Mirne, korištenje vode za vodoopskrbu te osiguranje biološkog minimuma rijeke Mirne. Sliv pokriva površinu od 73 km<sup>2</sup>. Gradnja je trajala 7 godina. Brana je završena 1986. godine. Kapacitet temeljnog ispusta pri normalnom vodostaju (41,00 m n.m.) je 88,00 m<sup>3</sup>/s. Dotok akumulacije iznosi od 120 m<sup>3</sup>/s za povratni period od 100 godina te 260 m<sup>3</sup>/s za povratni period od 10.000 godina. Podaci o dotoku su iz hidroloških podloga tijekom projektiranja i izgradnje, a trenutno se rade nove hidrološko-hidrauličke analize za rekonstrukciju brane u kojima će se obuhvatiti visokovodni događaji iz 2019. i 2022. godine.

Brana je projektirana i izvedena kao zonirana brana visine 23 m, asimetričnog presjeka s nagnutom glinenom jezgrom s uzvodne strane. Tijelo brane na uzvodnoj strani čini lomljeni vapnenac, a na nizvodnoj laporoviti materijal, s izvedenim filtarskim i drenažnim slojevima kako je naznačeno na slici 3. Prosječna širina jezgre iznosi 7,5 m, a najveća dubina temeljnog klina iznosi 3 m. Prirodna kota terena je 25 m n.m., a kruna brane je na visini od 44,7 m n.m., što je 2 m više od visine najvećeg uspora u akumulaciji. Širina brane u dnu je 95 m, dok je kruna širine 6 m. Nagib uzvodnog pokosa je 1:2, a nizvodnog 1:2,5. Duljina brane je 576 m a njezin volumen 510.000 m<sup>3</sup>.



Slika 2. Lokacija brane Butoniga (lijevo) i pogled na jezero Butoniga (desno), preuzeto iz [6]

Temeljno tlo je glina niske do srednje plastičnosti prosječne debljine 19 m. Ispod tog sloja nalazi se glinoviti šljunak (krš) do najveće dubine od 31,5 m ispod dna brane te lapor u podini koji je sa strane brane presvučen glinovitim pokrovom ili vapnencem.



**Slika 3. Karakteristični poprečni presjek brane Butoniga**

### 3.2 Program monitoringa brane

Sastavni dio programa monitoringa brane Butoniga obuhvaća sljedeće navedeno:

- vizualni pregled brane
- mjerenje razine vode u akumulaciji
- mjerenje procjedne vode
- mjerenje tlaka vode u piezometrima
- mjerenje pomaka geodetskih kontrolnih točaka
- mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane
- ostala mjerenja (oborine, temperatura vode, temperatura zraka, onečišćenje vode u akumulaciji).

Osoblje brane Butoniga svakodnevno pregledava branu i ostale objekte povezane s branom. Glavni ciljevi vizualnog opažanja su uočavanje nedostataka na konstrukciji, opažanje vidljivih pojava koje ukazuju na procese koji eventualno mogu oštetiti branu ili evakuacijske građevine te preliminarno utvrđivanje uzroka uočenih pojava i definiranje mjera za njihovo otklanjanje, uključivo mjere pojačanog monitoringa.

Mjerenja razine vode u akumulaciji se također obavlja svakodnevno. Ukoliko dođe do pojave bujica ili aktiviranja preljeva ili visokog vodnog vala koji prolazi kroz akumulaciju, podaci se prikupljaju i dostavljaju projektantima brane na daljnju obradu. Mjerenje količine procjedne vode provodi se svakodnevno na lokaciji lijevog i desnog drenažnog kanala kao i na lokaciji sabirnog kanala u nizvodnoj nožici. Količina i kakvoća oborina mjeri se svakodnevno kako bi se utvrdio utjecaj oborina na punjenje akumulacije. Statistička obrada izmjerenih podataka u dužem raz-

doblju potrebna je za izradu projekcije korištenja pitke vode u budućnosti. Tijekom izgradnje brane ugrađena su četiri piezometra u dva profila za mjerenje razine podzemne vode. Mjerenja se provode svakodnevno. Izgrađena je i mreža elektroakustičkih mjerača za mjerenje pornog tlaka u temeljnom tlu i glinenoj jezgri, ali se ova mreža pokazala nepouzdanom od samog početka monitoringa te su takva mjerenja naposljetku obustavljena. Već u izvještaju o godišnjem monitoringu za 1991. godinu dio mjerača nije bio ispravan, dva mjerača su očitavala veće pritiske u odnosu na maksimalnu vodu u jezeru, a nekoliko mjerača je izmjerilo vrijednosti skoro identične prethodnom mjerenju unatoč realnoj promjeni uvjeta u jezeru i brani. U izvještaju za 1997. godinu preostala su samo 2 ispravna elektroakustična mjerača pornog tlaka i to jedan pri samoj kruni brane te su ta mjerenja obustavljena. Tijekom obnove i proširenja opažačke mreže 2007. godine su dodana dva mjerna profila sa 17 novih piezometara.

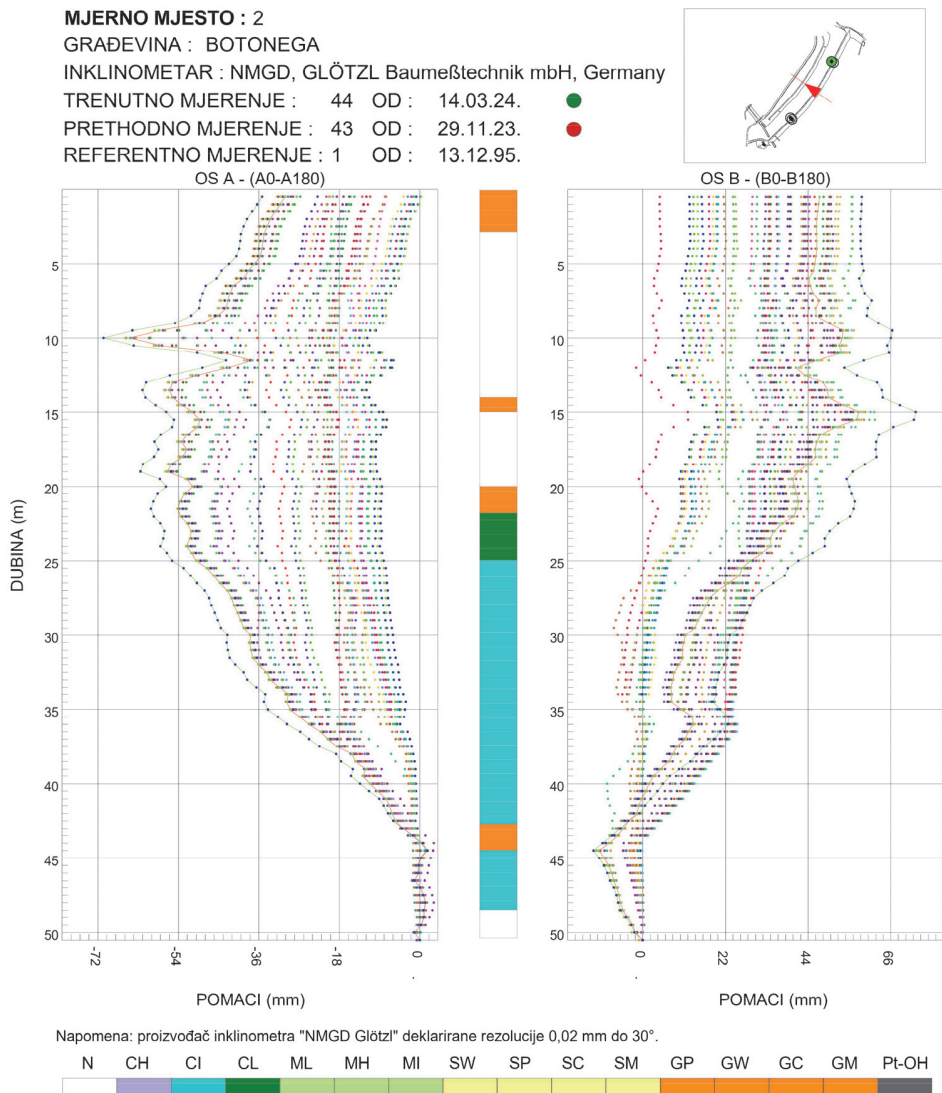
Vrlo važan dio programa monitoringa brane Butoniga su i mjerenja pomaka na koje se stavlja naglasak u ovom radu. Geodetska mjerenja provode se na ukupno 65 geodetskih točaka postavljenih na preljevu, umirujućem bazenu i na kruni brane. Pri tome se mjerenja pomaka na geodetskim točkama obavljaju svake godine za što se izrađuje i godišnji elaborat, a rezultati se prikazuju kumulativno, ovisno o vremenu, za sva mjerenja od kraja izgradnje i ugradnje mjerne opreme. Jednako tako, godišnje se prikupljaju i podaci o horizontalnim pomacima na četiri inklinometra ugrađena u tijelu brane. Duljina inklinometra varira od 40 do 50 m, a raspoređeni su u dva mjerna profila. Osim na godišnjoj razini, mjerenja pomaka na brani se provode po potrebi i tijekom izvanrednih događaja, primjerice za vrijeme i nakon visokog vodostaja u akumulaciji, nakon potresa magnitude veće od 5 prema Richteru i zbog drugih neočekivanih pojava.

### **3.3 Prikaz nekih rezultata monitoringa pomaka brane u vremenu**

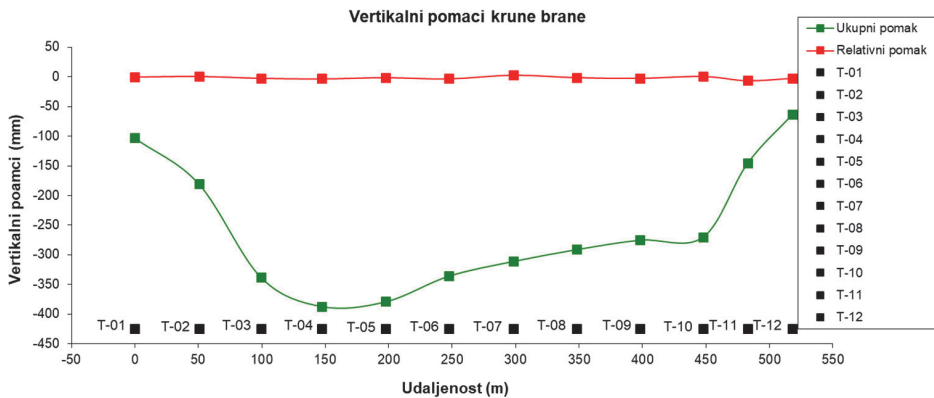
Na slici 4 su prikazani rezultati mjerenja na jednom od 4 ugrađena inklinometra čija je pozicija naznačena na samoj slici. Mjerenja horizontalnih pomaka su izvršena u dvije okomite osi te se može uočiti da najveći pomak u osi A (okomito na branu) u odnosu na referentno mjerenje iznosi 70,74 mm na dubini od 10 m, dok najveći pomak u osi B (uzdužno na branu) u odnosu na referentno mjerenje iznosi 72,68 mm na dubini od 15 m.

Bez ulaženja u korelaciju izmjerenih pomaka s uvjetima opterećenja same brane, što je van opsega ovog rada, jasno je da ovakvi podaci mogu biti itekako vrijedni da se stekne uvid u horizontalno pomicanje brane ovisno o uvjetima opterećenja. Pri tome se iz izmjerenih horizontalnih pomaka brane, provedenih do danas, može uočiti elastično ponašanje tijela brane pri promjenama vodostaja u akumulaciji, a isto tako u slučaju progresije pomaka može se pravovremeno pokrenuti pojačano održavanje i sanacija brane.

Na slici 5 je prikaz mjerenja relativnih (između posljednja 2 uzastopna mjerenja) i apsolutnih (od početka mjerenja) pomaka u vertikalnoj ravnini za sve kontrolne točke na brani, mjereno na geodetskim točkama. Vertikalni pomaci posljedica su slijeganja tijela brane i slijeganja temeljnog tla na kojem je brana izgrađena. Kumulativno, ukupni vertikalni pomaci kontrolnih točaka na kruni brane kreću se od 63,0 mm (točka 12) do 387,0 mm (točka 04) u smjeru slijeganja. Ukupna vrijednost slijeganja u ovom trenutku iznosi oko 1,5 % visine brane što je ispod prosjeka vrijednosti slijeganja za nasute građevine ovoga tipa [8] koje se kreće oko 5 % za povoljne uvjete ugradnje i kvalitetni materijal.



Slika 4. Rezultati mjerenja horizontalnih pomaka brane Butoniga na jednom ugrađenom inklinometru



Slika 5. Slijeganje brane Butoniga geodetskim mjerenjem kontrolnih točaka na kruni brane [7]

## 4 Zaključak

Monitoring velikih zemljanih brana je od ključne važnosti za kontinuirano praćenje njihovog ponašanja ovisno o uvjetima opterećenja u kojima se nalaze. Ovo je naročito važno u uvjetima sveprisutnih klimatskih promjena uzimajući u obzir izrazitu osjetljivost zemljanih brana na promjene obrazaca padalina i pojave dužih sušnih razdoblja. Stoga se širok raspon opreme za monitoring može koristiti u svim fazama projektnog vijeka brane, tijekom izvedbe i tijekom eksploatacije, uključivo mjerače deformacije tla, piezometre, mjerače procjeđivanja vode kroz branu i kroz temeljno tlo, mjerače temperature, ćelije za mjerenje naprežanja, kao i mjerenje pomaka primjenom geodetskih repera i inklinometara. Za potonje je u radu prikazan primjer dugogodišnjeg mjerenja prostornih pomaka na geodetskim reperima i horizontalnih pomaka po dubini brane kroz monitoring brane Butoniga u Istri. Voda iz sustava jezera Butonige distribuira se prema potrošačima u Pazinu, Poreču i Rovinju, a upravo je zemljana brana ključni element sustava. Mjerenja pomaka se obavljaju na godišnjoj bazi, a po potrebi dodatno i u izvanrednim slučajevima. Mjerenja slijeganja brane pokazuju da je ukupna vrijednost slijeganja u ovom trenutku oko 1,5 % visine brane što je ispod prosjeka vrijednosti slijeganja za nasute građevine ovoga tipa [8] koja se kreću oko 5 %, dok mjerenja horizontalnih pomaka na 4 ugrađena inklinometra upućuju na elastično ponašanje tijela brane pri promjenama vodostaja u akumulaciji. Ovakav sustav monitoringa brane omogućava sustavno planiranje održavanja brane i produljenje njenog radnog vijeka te rano upozorenje na moguća oštećenja ili posljedice elementarnih nepogoda.

## Literatura

- [1] ICOLD (International Organization on Large Dams). Constitution Statuts, ICOLD, Paris, France, 2011.
- [2] IUCN (The World Conservation Union & the World Bank Group). Large dams: Learning from the past, looking at the future, Workshop proceedings, Gland, Switzerland, 1997.
- [3] Mitrevska, M., Mileski, T., Mikac, R. Critical infrastructure : concept and security challenges, Friedrich Ebert Foundation, Skopje, North Macedonia, 2019
- [4] Kovačević, M.S., Bačić, M., Stipanović, I., Gavin, K. Categorization of the Condition of Railway Embankments Using a Multi-Attribute Utility Theory”, Applied Sciences-Basel, 9 (2019) 23, do: 10.3390/app9235089
- [5] URL: [www.geokon.com](http://www.geokon.com), Miscellaneous Items, Dam Monitoring Instrumentation (Accessed on May 10<sup>th</sup> 2024)
- [6] URL: [www.hr.wikipedia.org/wiki/Butoniga\\_%28jezero%29](http://www.hr.wikipedia.org/wiki/Butoniga_%28jezero%29) (Accessed on May 5<sup>th</sup> 2024)
- [7] Geokon – Zagreb. Godišnji izvještaj o redovitom tehničkom promatranju brane Butoniga, tehničko promatranje, Geokon – Zagreb d.d., 2022.
- [8] Water Resources Division, Department of Primary Industries and Water. Guidelines for the construction of earth-fill dams, Hobart, Tasmania, 2008.





# Sustav za potporu u odlučivanju za upravljanje rizicima u infrastrukturnim projektima

Ladislav Bevanda<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Anita Cerić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hering d.d. Široki Brijeg, lbevanda@hering.ba

<sup>2</sup>Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, anita.ceric@grad.unizg.hr

## Sažetak

Upravljanje rizicima u infrastrukturnim projektima je važno za uspjeh projekta. Proces rizika se sastoji od identifikacije rizika, analize i odgovora na rizik. Prvi i najvažniji korak je sama identifikaciju rizika. Za analizu rizika se mogu koristiti razne kvalitativne i kvantitativne metode. Sustav za potporu odlučivanju predstavlja važan alat koji pomaže u upravljanju rizicima kroz uspostave baza identificiranih rizika, njihovih analiza i odgovora. Za donositelja odluka je korištenjem ovakvog sustava puno brže donijeti odluku o važnosti pojedinog rizika i utjecati na uspjeh projekta.

*Ključne riječi: sustav za potporu odlučivanju, upravljanje rizicima, građevinski projekti*

## Decision Support System for risk management in infrastructure projects

### Abstract

Risk management in infrastructure projects is important to the success of the project. The risk process consists of risk identification, risk analysis and response. The first most important first step is the identification of the risk itself. Various qualitative and quantitative methods can be used for risk analysis. The decision support system is an important tool that helps in risk management through the establishment of a database of identified risks, their analysis and responses. For the decision maker, the use of such a system is much faster to make a decision about the importance of a particular risk and influence the success of the project.

*Key words: decision support system, risk management, construction projects*

## 1 Uvod

Donošenje odluka dio je svakodnevnog poslovanja u svim vrstama organizacija, područjima djelovanja i na svim razinama odlučivanja. Odluke mogu varirati od manjih, kratkoročnih ulaganja do strateških poteza koji oblikuju budućnost poduzeća. Zbog toga je podrška u donošenju odluka postala značajno područje primjene računarstva, s ciljem omogućavanja donošenja kvalitetnih i pravovremenih odluka. Kvaliteta odluke ovisi o različitim čimbenicima, uključujući adekvatnost i kvalitetu informacija, broj dostupnih alternativa te upotrebu odgovarajućih modela za izbor najbolje opcije. U ovom kontekstu, računarstvo igra ključnu ulogu, jer omogućuje analizu velikih količina podataka i pruža alate za procjenu različitih scenarija, čime pomaže donositeljima odluka da bolje razumiju opcije koje im stoje na raspolaganju i posljedice svojih odluka.

Donošenje odluka odvija se u uvjetima sigurnosti, rizika ili nesigurnosti. Sigurnost predstavlja stanje u kojem se svi relevantni faktori mogu precizno kvantificirati. U takvim uvjetima, moguće je točno predvidjeti ishod. Međutim, ovo stanje je izuzetno rijetko i obično se susreće samo u zatvorenim sustavima. U praksi, posebno u dinamičnim područjima poput građevinarstva, rijetko se susreću uvjeti potpune sigurnosti. Rizik nastaje kada donositelj odluka može procijeniti vjerojatnost određenog ishoda, bilo na temelju racionalne analize ili intuicije. Nesigurnost se javlja kada ne postoji dovoljno informacija ili iskustva da bi se mogao postaviti matematički model za prognozu vjerojatnog rezultata.

Upravljanje rizicima ključno je za uspjeh svakog projekta [1]. Pravovremena identifikacija i analiza rizika mogu osigurati da projekt postigne svoje ciljeve, čak i u slučaju nepredviđenih situacija. Upravljanje rizicima može se smatrati sustavom ranog upozorenja koji identificira potencijalne probleme i omogućava donošenje najbolje odluke u datom trenutku. Svaki projekt prolazi kroz nekoliko ključnih faza, od početne ideje, preko projektiranja, izvođenja, primopredaje, pa do eventualnog uklanjanja ili prenamjene građevine. Svaka od tih faza nosi specifične rizike koji mogu utjecati na uspjeh projekta. Moderni pristupi upravljanju rizicima sve više uključuju korištenje naprednih tehnologija i alata za podršku odlučivanju, kao što su analitika podataka, modeli za simulaciju i sustavi za rano upozorenje. Ovi alati omogućuju učinkovitije upravljanje rizicima i povećavaju šanse za uspjeh projekta.

Najjednostavniji proces upravljanja rizicima sastoji se od identifikacije, analize i odgovora na rizik. Složeniji procesi su ciklički i nakon što je donesena odluka o odgovoru na rizik potrebno je pratiti kako taj odgovor utječe dalje na projekt te postoje li daljnje posljedice odnosno da li odgovor na rizik prouzrokuje novi rizik koji traži ponovnu analizu i adekvatan odgovor. Zadnjih godina standardi kao što su PMI [2] i ISO [3] zastupaju stavove cikličkog i kontinuiranog upravljanja rizicima. Detaljnije o cikličkom procesu može se naći u [1].

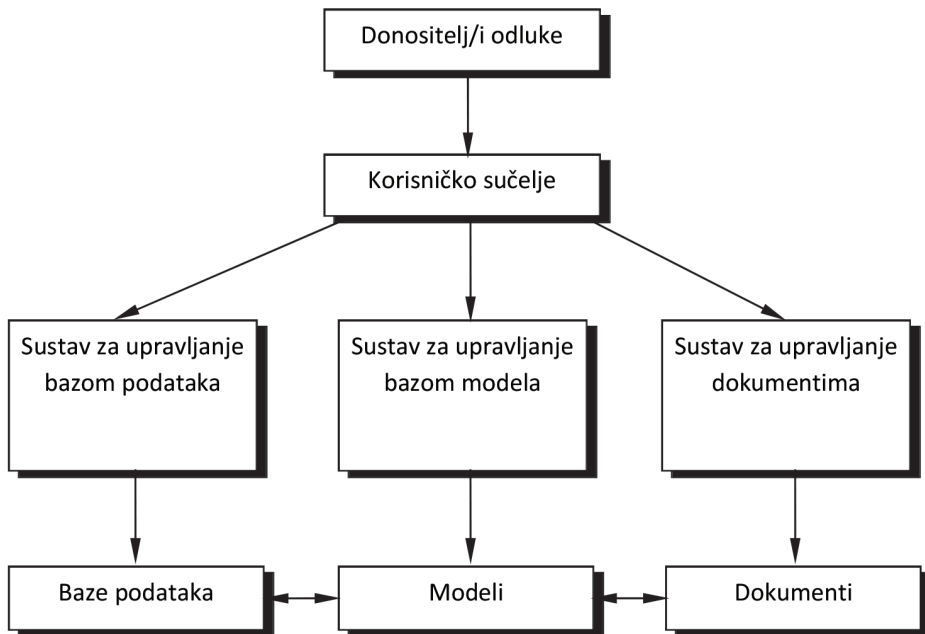
Postoje razne kategorizacije rizika koje imaju svoje potkategorije, Najčešća kategorizacija rizika obuhvaća podjelu na: političke, okolišne, ekonomske, zakonodavne, tehničke, prirodne, tržišne, te rizike koje se odnose na zaštitu na radu i zaštitu od kriminalnih radnji [4].

U ovom radu naglasak je na sustavu za potporu odlučivanju koji bi trebao biti potpora donositelju odluka u upravljanju rizicima. Korištenjem ovakvog sustava odluke bi se donosile brže, a baze rizika bi se mogle nadopunjavati kroz nove projekte i na taj način služiti kao rani sustav upozorenja na moguće rizike što na kraju poboljšava sam proces upravljanja rizicima i trebalo bi utjecati pozitivno i na sam uspjeh projekta.

## 2 Sustavi za potporu odlučivanju

Sustavi za podršku odlučivanju pomažu u donošenju odluka, osobito kada se radi o fragmentiranim informacijama i složenim problemima [5]. Oni prikupljaju i analiziraju relevantne podatke, uključujući informacije o troškovima, vremenskim uvjetima, resursima i drugim ključnim varijablama koje utječu na uspjeh projekta. Osiguravaju alate za analizu rizika, što omogućuje procjenu potencijalnih prijetnji i prilika u projektu. Ta analiza pomaže u identifikaciji i smanjenju rizika, što je osobito važno u infrastrukturnim projektima gdje su ulogi visoki. Sustavi pomažu u planiranju i optimizaciji resursa, vremena i budžeta. Oni koriste modele i algoritme za generiranje optimalnih planova, omogućujući učinkovitu raspodjelu resursa. Sustavi također omogućuju simulaciju različitih scenarija i predviđanje ishoda, što pomaže u razumijevanju potencijalnih posljedica odluka. Ovo je ključno za donošenje strateških odluka u infrastrukturnim projektima, gdje promjene mogu imati dugoročne implikacije. Na kraju, sustavi za podršku odlučivanju olakšavaju komunikaciju i suradnju među svim sudionicima u realizaciji infrastrukturnih projekata.

Struktura sustava za potporu odlučivanju prikazana je na slici 1. Osnovni elementi sustava su podaci, modeli, dokumenti i korisničko sučelje. Podacima, modelima i dokumentima pristupa se pomoću odgovarajućih sustava za upravljanje, a korisnik pristupa cijelom sustavu pomoću jedinstvenog sučelja. Tijekom rada sustava za potporu odlučivanju modeli mogu sami dohvatiti potrebne podatke iz baza podataka ili baze dokumenata, a nakon izvođenja rezultati se mogu pohranjivati u baze podataka ili dokumenata [6]. U nastavku slijedi kratki opis najvažnijih elementa sustava za potporu odlučivanju.



**Slika 1. Elementi sustava za potporu odlučivanju**

Glavni izvori podataka bi u slučaju upravljanja rizicima bile baze podataka identificiranih rizika po pojedinom projektu. U tim bazama mogli bi se nalaziti i rizici i koji su nastali na drugim sličnim projektima, ali bi korisnik sustava za potporu odlučivanju zajedno sa suradnicima koji sudjeluju o odlučivanju odabrao one rizike koje se odnose na konkretan projekt i dalje s njima upravljao na adekvantan način nakon analize svakog pojedinog rizika.

Sustav za upravljanje bazom modela omogućuje korištenje modela koji su potrebni za analizu alternativa kod odlučivanja o prioritetima i odgovorima na identificirane rizike. Također, s modelima je moguće raditi odgovarajuće analize osjetljivosti dobivenih rezultata. U sustav za potporu odlučivanju moguće je uključiti različite vrste modela, kako po metodama na kojima se modeli temelje, tako i po vrstama problema koje rješavaju i razinama upravljanja na kojima se koriste. Knjižnica modela može sadržavati statističke, optimizacijske ili simulacijske modele, modele temeljene na neuronskim mrežama, genetskim algoritmima ili neizrastoj logici. Prema razinama odlučivanja na kojoj se koriste odabrani modeli mogu biti strategijski, taktični i operativni.

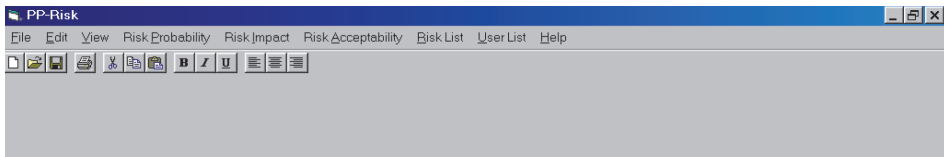
Dokumenti u sustava za potporu odlučivanja sadrže različite vrste nestrukturiranih podataka. Dokumenti se najčešće sastoje od teksta, grafičkih prikaza, slika, glasa i videozapisa. Primjeri dokumenata su izvještaji, pisma korisnika, interne poruke, ugovori, i elektroničke poruke. Da bi se dokumenti mogli koristiti u od-

lučivanju oni moraju biti efikasno pohranjeni i moraju se moći interpretirati i pretraživati.

Korisničko sučelje obuhvaća načine potrebne za unos podataka u sustav, razradu modela te izlaz podataka. Ono je izuzetno važna komponenta sustava za potporu odlučivanju jer je sučelje za korisnika zapravo sam sustav. Slabo oblikovano sučelje može odbiti korisnike čak i ako su ostali dijelovi sustava dobro napravljeni.

### 3 Primjer sustava za potporu odlučivanju – program PP-Risk

PP-risk je samostalni cjeloviti informacijski sustav koji zadovoljava sve elemente sustava za potporu odlučivanju. Razvijen je u MS Visual Basic 6 razvojnom okruženju na Microsoft Windows platformi [7]. Korisničko sučelje (interface) obuhvaća mehanizme potrebne za unos podataka u sustav, izvođenje modela te izlaz podataka (slika 2). Iz glavnog izbornika moguće je ažurirati listu projekata, listu korisnika za pojedini projekt te listu ključnih rizika, odnosno rizika koji će se analizirati u svakoj fazi. Nadalje moguće je prijeći na određivanje vjerojatnosti rizika i utjecaja rizika na projekt, čime je određena izloženost riziku. Na kraju moguće je izravno prijeći na određivanje prihvatljivosti rizika u slučaju da su donesene i smještene u bazu podataka sve potrebne odluke.

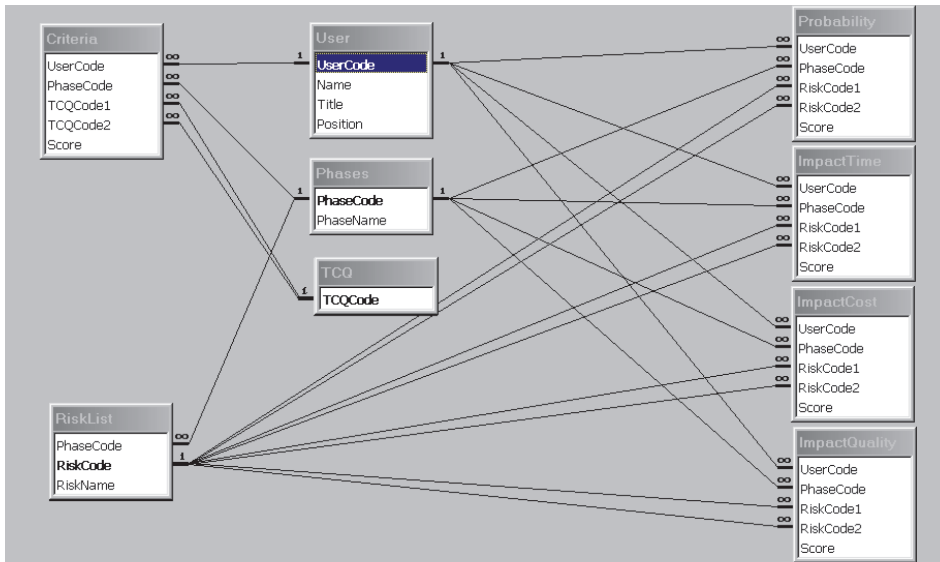


Slika 2. Glavni izbornik PP-Riska

Sustav za upravljanje bazom podataka omogućava kreiranje, uporabu i održavanje relacijskih baza podataka. Baze podataka kojima MS Visual Basic 6 upravlja sastoje se iz tabela koje se sastoje iz polja zapisa. Tabele su međusobno povezane kroz set sličnih podataka, koji se nazivaju ključevi. Ključ identificira zapis i može ga povezati s drugim zapisom iz iste tabele ili zapisima iz druge tabele ili drugih tabela.

Za pristup i manipulaciju bazom podataka korišten je Structured Query Language (SQL). To je programski jezik koji koristi većina računarskih programa za pristup dataset orijentiranim bazama podataka.

Na slici 3. grafički su prikazane tablice baze podataka sa odgovarajućim poljima i vezama među njima.



Slika 3. Struktura baze podataka sa pripadnim tablicama, poljima i međusobnim vezama [7]

#### 4 Primjena programa PP-Risk na infrastrukturnom projektu izgradnje tunelela

Za prikaz primjene sustava za potporu odlučivanju odabran je tunel "Sveta tri kralja". Tunel se nalazi na autocesti Zagreb-Macelj i dug je 1.740 m. Trasa tunela većim dijelom se nalazi u kategorijama najslabijih stijena tipa s visokim razinama podzemne vode i velikim brojem prirodnih klizišta [8].

Prvi korak u primjeni sustava bio je odabir experata. Ukupno je sudjelovalo 18 experata koji su imali značajno učešće u realizaciji sličnih objekata u prošlosti. Svim expertima podijeljeni su obrasci u obliku upitnika koji su napravljeni za svaku fazu posebno. Obrasci su prilagođeni AHP metodi i omogućavaju donošenje niza prosudbi o međusobnim odnosima identificiranih rizika u odnosu na vjerojatnost, vrijeme, troškove i kvalitetu, kao i definiranje međusobnog značaja vremena, troškova i kvalitete u svakoj fazi. U drugom koraku su rezultati usporedbe uneseni u bazu podataka računalnog programa PP-Riski nakon izračuna izloženosti riziku; od eksperata je zatraženo da daju odgovarajući odgovor na rizik. Na kraju, u trećem koraku voditelj projekta je donio prosudbe i odgovore na rizike za sve faze projekta, uzimajući u obzir sve prosudbe stručnjaka, kao i dobivene izloženosti i odgovarajuće odgovore na rizike. Popis ključnih rizika identificiranih i analiziranih za zadnju, devetu fazu projekta: Korištenje i održavanje je bio slijedeći:

- 901: Unsatisfactory Building Performance Measurement (Nezadovoljavajuće praćenje funkcioniranja tunela)

- 902: Lack of Maintenance Strategies Update (Nedostatak ažuriranja strategija održavanja) i
- 903: Lack of Lifecycle Budgetary Requirements Update ) Nedostatak ažuriranja proračunskih zahtjeva za životni ciklus tunela).

Rezultati analize za devetu fazu prikazani su na slici 4.

The screenshot shows the 'Risk Acceptability' dialog box in the PP Risk software. The dialog has three main sections: User, Phase, and Risk Code. The User section shows 'U19' and 'Project manager'. The Phase section shows '9' and 'PHASE NINE - OPERATION AND MAINTENANCE'. The Risk Code section shows '901' and 'Unsatisfactory Building Performance Measurement'. Below the dialog is a table with the following data:

RISK	Probability	Impact	Exposure	Acceptability
901	0.524	0.492	0.258	UNACCEPTABLE
902	0.279	0.331	0.092	ACCEPTABLE
903	0.197	0.177	0.035	ACCEPTABLE

Slika 4. Izloženost riziku i prihvatljivost rizika za fazu projekta: Korištenje i održavanje

## 5 Zaključak

Sustavi za potporu odlučivanju ključni su za učinkovitu izgradnju, upravljanje i održavanje infrastrukturnih objekata, no imaju i određene nedostatke. Implementacija je skupa i zahtijeva značajna ulaganja u tehnologiju i obuku osoblja. Sustavi su složeni i mogu ograničiti dostupnost manjim organizacijama, a postoji i rizik od prevelikog oslanjanja na tehnologiju te kvaliteta odluka ovisi o točnosti unesenih podataka. Način ugovaranja projekata također može utjecati na ograničenja i razdiobu rizika. Tradicionalni način može izazvati probleme u koordinaciji, Design-Build način može kompromitirati kvalitetu, Construction Management način zahtijeva visoku razinu koordinacije, a Public-Private Partnership nosi kompleksne ugovore i dugoročne obveze. Unatoč tim ograničenjima, sustavi povećavaju šanse za uspjeh projekta kroz bolje informirane i brže odlučivanje.

## Literatura

- [1] Cerić, A.: A Framework for Process-Driven Risk Management in Construction Projects, Research Institute for the Built and Human Environment, School of Construction and Property Management, University of Salford.
- [2] PMI – Project Management Institute: A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), 6. izd., Newtown Square, Project Management Institute, Inc., 2017.
- [3] ISO: Risk management — Guidelines, ISO 31000:2018, 2018.
- [4] CIRIA – Construction Industry Research and Information Association, Control of Risk: A Guide to the Systematic Management of Risk from Construction, London, CIRIA, 2003.
- [5] Rosmayati, M., Abdul R.: A Comprehensive Review of Decision Support Systems in Construction Tender Management. International Journal of Civil Engineering and Technology, 9(2018) 7, pp. 1871-1886.
- [6] Cook, T.M., Russell, R.A.: Introduction to Management Science, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.
- [7] Cerić, A. Brandon, P.: An IT Toolkit for Managing Risk in Construction Projects, Designing, Managing and Supporting Construction Projects Through Innovation and IT Solutions, (ur. Brandon, P., Li, H., Shen, Q.) Construction Industry Developing Board Malaysia, pp. 625-641, 2004.
- [8] Cerić, A.; Marčić, D.; Ivandić, K.: A Risk-Assessment Methodology in Tunneling , Tehnički vjesnik, 18 (2011), 4, 529-536



# Utjecaj rizika klimatskih promjena na zgrade sa statusom kulturnog dobra

**Petra Vučetić Osonjački<sup>1</sup>**, prof. dr. sc. **Anita Cerić<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Regionalna energetska-klimatska agencija Sjeverozapadne Hrvatske, pvosonjacki@regea.org

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

## Sažetak

Utjecaj klimatskih promjena je značajan za sve građevine, a posebno je od velike važnosti kod zgrada koje imaju status kulturnog dobra. Europska Unija redovito publicira izvještaje o otpornosti zgrada sa statusom kulturnog dobra na klimatske promjene. U izvješćima se preporučuju konkretne radnje, poput obnove zgrada i potrebe za poboljšanjem održavanja zgrada s ciljem povećanja otpornosti i prilagodbe na klimatske rizike. U ovom radu se daje kratki prikaz važnosti teme prilagodbe zgrada sa statusom kulturnog dobra klimatskim rizicima te primjer mjera za ublažavanje i prilagodbu zgrada sa statusom kulturnog dobra na utjecaje klimatskih rizika.

*Ključne riječi: klimatski rizici, prilagodba zgrada klimatskim promjenama, zgrade sa statusom kulturnog dobra*

## Climate change risk impact to cultural heritage buildings

### Abstract

The impact of climate change is significant for all buildings, and this is especially important for cultural heritage buildings. The European Union publishes reports on the resilience of cultural heritage buildings to climate change. The reports recommend specific actions, such as the renovation of buildings and the need to improve the maintenance of buildings in order to increase building resilience and adaptation to climate risks. This paper presents a brief overview of the importance of cultural heritage buildings' adaptation to climate risks. Furthermore, an example of measures for cultural heritage buildings adaptation to the impact of climate risks is presented.

*Key words: cultural heritage buildings, climate risks, building adaptation*

## 1 Uvod

Zgrade sa statusom kulturnog dobra koje su dio nepokretne kulturne baštine, bilo da su pojedinačno zaštićene ili su dio kulturno-povijesnih cjelina, građene su u različitim područjima i različitim tehnikama, a ono što im je zajedničko je izražena potreba za očuvanjem i obnovom. Budući da je prirodne nepogode koje uzrokuju klimatske promjene nemoguće u potpunosti predvidjeti i spriječiti, jedan od najvećih izazova u upravljanju zgradama je kako smanjiti njihovu ranjivost i jačati otpornost na klimatske promjene. Kako bi se zaštitila vrijednost i značaj zgrada sa statusom kulturnog dobra neophodno je razraditi mjere za ublažavanje utjecaja klimatskih rizika te načine prilagodbe ovakvih zgrada novim okolišnim uvjetima. Razumijevanje upravljanja rizicima za zgrade sa statusom kulturnog dobra zahtjeva razjašnjenje skupa ključnih i povezanih pojmova kao što su rizik i ranjivost. U kontekstu procjene utjecaja klimatskih promjena rizik se često upotrebljava u značenju potencijala za štetne posljedice klimatskih nepogoda za kulturna dobra i infrastrukturu. Rizik je kombinacija djelovanja klimatske nepogode, odnosno njezine vjerojatnosti pojave, te ranjivosti (engl. vulnerability) i izloženosti (engl. exposure) kulturnog dobra i infrastrukture [1]. Ranjivost zgrada sa statusom kulturnog dobra može se opisati kao vjerojatnost djelomičnog ili potpunog gubitka vrijednosti i značaja kulturne baštine zbog klimatskih promjena [2].

*Europsko izvješće o klimatskim rizicima (EUCRA – European Climate Risk Assessment)* [3] izrađeno od strane Europske agencije za okoliš upućuje na to da su ključni klimatski rizici za izgrađeni okoliš šteta na infrastrukturi i zgradama zbog klimatskih promjena i ekstremnih klimatskih pojava te rizici za dobrobit ljudi od utjecaja klimatskih promjena na zgrade. Kao rezultat učinaka klimatskih promjena predviđa se povećanje štete od ekstremnih vremenskih prilika na izgrađenom okolišu do 10 puta do kraja 21. stoljeća u odnosu na dosadašnje štete. Izvješće [3] naglašava potrebu ulaganja u projektiranje zgrada koje su klimatski otporne za novoizgrađene zgrade i postojeće zgrade koje se obnavljaju, bez umanjivanja kulturnih ili gospodarskih vrijednosti područja od povijesnog značaja ili zgrada s povijesnom vrijednošću.

Nedavno *Izvješće o jačanju otpornosti kulturne baštine na klimatske promjene* [4] izdano 2022. godine od strane Europske komisije ukazalo je na činjenicu da je samo 12 od 28 zemalja spomenulo kulturnu baštinu u politikama vezanim uz klimatske promjene, dok samo 7 zemalja ima dostupne planove za usklađivanje klimatskih promjena i kulturne baštine: Irska, Grčka, Italija, Cipar, Slovenija, Finska i Švedska.

## 2 Primjer mjera prilagodbe zgrada sa statusom kulturnog dobra pod utjecajem klimatskih rizika

Pregled postojeće literature koja se bavi klimatskim rizicima u kontekstu zgrada sa statusom kulturnog dobra dao je uvid u ključne klimatske rizike koji su gotovo uvijek vezani uz ekstremne temperature i oborine, atmosfersku vlagu, vjetar, poplave, podizanje razine mora, suše, oluje, klizišta i požare [5-8]. Uz prethodno nabrojane klimatske rizike, UNESCO je kao prijetnje kulturnoj baštini identificirao i interakciju između klimatskih promjena i onečišćenja zraka [5].

Prema Sesana i dr. [8], postupne promjene klimatskih varijabli utječu na mehanizme degradacije kulturne baštine izložene vanjskom okolišu. Voda je glavni uzročnik degradacije materijala. Povećanje količine oborina i drugih varijabli povezanih s vodom kao što su ciklusi vlažnosti i razdoblja vlage, u kombinaciji s višim temperaturama, mogu uzrokovati ili pojačati različite mehanizme raspadanja, na primjer, koroziju, biološku degradaciju, savijanje i cijepanje higroskopnih materijala te eflorescencija i subflorescencija zbog kristalizacije soli. Povećanje intenziteta vjetra i vjetrom nošene kiše također će utjecati na kulturnu baštinu, osobito u prisutnosti pijeska, soli i atmosferskih zagađivača. To može dovesti do površinske abrazije, povećanog prodora vode, oštećenja strukture i potencijalno urušavanja konstrukcije. Viša temperatura može rezultirati povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja što može pojačati fizičko trošenje kamena i keramičkih materijala. Dodatno, klimatske promjene mogu promijeniti prirodni fizički okoliš s ozbiljnim posljedicama za očuvanje kulturne baštine. Postupne promjene, kao što su zagrijavanje oceana te podizanje razine mora i s njime povezani obalni utjecaji i otapanje permafrosta, mogu dovesti do pojave poplava, suša, toplinskih valova i klizišta s izravnim, ponekad katastrofalnim učincima na kulturnu baštinu. Mogu se pojaviti i neizravni učinci, kao što su povećanje kristalizacije soli i korozije metala. Također se očekuje povećanje dezertifikacije u toplijoj i sušoj klimi te s njime povezani rizici za kulturnu baštinu.

Proces pripreme zgrada sa statusom kulturnog dobra na klimatske promjene započinje analizom dostupnih klimatskih podataka za lokaciju zgrade. Potom slijedi identifikacija klimatskih rizika kojima je zgrada sa statusom kulturnog dobra izložena. Na temelju analize utjecaja identificiranih rizika predlažu se mjere prilagodbe na očekivani klimatski rizik. U Tablici 1. u nastavku prikazan je prijedlog mogućih mjera prilagodbe na neke od najčešće adresiranih klimatskih rizika. Mjere prilagodbe prikazane u Tablici 1. nastale su kao sublimacija podataka o rizicima iz projekata koji su analizirani od strane Regionalne energetske-klimatske agencije Sjeverozapadne Hrvatske (REGEA).

**Tablica 1. Prijedlog mogućih mjera prilagodbe zgrada na neke od najčešćih klimatskih rizika [9]**

Klimatski rizik	Prijedlog mogućih mjera prilagodbe na očekivani klimatski rizik
Ekstremna vrućina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Povećanje toplinske zaštite ovojnice grijanog prostora</li> <li>• Ugradnja sjenila</li> <li>• Unaprjeđenje postojećih ili ugradnja novih visokoučinkovitih sustava za hlađenje, ventilaciju, klimatizaciju, automatsko upravljanje zgradom</li> <li>• Primjena elemenata zelene infrastrukture (npr. zeleni krovovi, zelena pročelja)</li> <li>• Smještaj elemenata fotonaponske elektrane koji služe za kontrolu proizvodnje i pretvorbe energije u kontrolirane uvjete kako bi se smanjila njihova izloženost visokim temperaturama i direktna osunčanost</li> <li>• Smještaj fotonaponskih panela na način da su povišeni u odnosu na krovnu površinu kako bi se osiguralo nesmetano strujanje zraka koje u određenoj mjeri ima efekt hlađenja</li> </ul>
Naleti snažnog vjetra	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dodatno učvršćivanje vanjskih elemenata kako bi izdržali nalete snažnog vjetra</li> <li>• Dodatno učvršćivanje fotonaponskih panela i smještanje na način da su povišeni u odnosu na krovnu površinu kako bi se osiguralo nesmetano strujanje zraka i smanjenje otpora koje bi moglo uzrokovati fizičko oštećenje</li> </ul>
Pojava pijavica i tornada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dodatno učvršćivanje vanjskih elemenata kako bi izdržali nalete snažnog vjetra</li> <li>• Dodatno učvršćivanje fotonaponskih panela i smještanje na način da su povišeni u odnosu na krovnu površinu kako bi se osiguralo nesmetano strujanje zraka i smanjenje otpora koje bi moglo uzrokovati fizičko oštećenje</li> </ul>
Pojava tuče	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ugradnja materijala koji imaju značajnu mehaničku otpornost</li> <li>• Ugradnja fotonaponskih panela koji imaju značajnu mehaničku otpornost</li> </ul>
Velike količine padalina u kratkom vremenskom razdoblju	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sanacija postojeće vlage kao preduvjet energetske/sveobuhvatnoj obnovi</li> <li>• Odvodnja oborinske vode u javnu kanalizaciju linijskim kanalicama te gravitacijskim odvodnim sustavom</li> <li>• Ozelenjavanje čestice oko građevine ili popločavanje vodopropusnim pločama</li> <li>• Ugradnja poroznih materijala, kišnih vrtova i dr.</li> <li>• Izvedba nosive konstrukcije fotonaponske elektrane na način da velike količine oborina ne mogu utjecati na osjetljive komponente</li> </ul>
Požari	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usklađivanje sa zahtjevima za zaštitu od požara</li> <li>• Sprinkler sustav, negorivi materijali, vanjska i unutarnja hidrantska mreža</li> <li>• Smještanje elemenata fotonaponske elektrane koji služe za kontrolu proizvodnje i pretvorbe energije u kontrolirane uvjete kako bi se smanjila njihova izloženost visokim temperaturama i direktna osunčanost i potencijalno pregrijavanje koje može dovesti do požara</li> <li>• Smještanje fotonaponskih panela na način da su povišeni u odnosu na krovnu površinu kako bi se osiguralo nesmetano strujanje zraka koje u određenoj mjeri ima efekt hlađenja</li> </ul>

Većina pojedinačno zaštićenih zgrada sa statusom kulturnog dobra (njih 93%) izgrađena je u razdoblju prije 1930. godine kada nisu postojali propisi za toplinsku zaštitu [10]. Stoga Veršić i dr. [10] donose niz smjernica za energetske obnovu zgrada sa statusom kulturnog dobra, koje su opisane u nastavku. Energetska obnova postojećeg fonda zgrada nedvojbeno je ključna mjera prilagodbe zgrada na klimatske promjene. Potrebno je inzistirati na toplinskoj izolaciji ovojnice, ali nuž-

no je i poticati primjenu visokoučinkovitih i obnovljivih sustava za grijanje i hlađenje kako bi se iskoristio cjelokupan potencijal obnove postojećeg fonda zgrada. Zbog specifičnih ograničenja na zgradama sa statusom kulturnog dobra, koje su posljedica iznimne vrijednosti pojedinih dijelova tih zgrada, mjere energetske obnove potrebno je ostvariti na dijelovima gdje su ograničenja manja ili ih nema. Prilikom odabira materijala važno je predvidjeti upotrebu kompatibilnih materijala koji neće narušiti autentičnost i izvornost zgrade, a dugoročno neće dovesti do pogoršanja fizičkog stanja zgrade. Materijali bi trebali biti paropropusni kako bi omogućili "disanje" izvornih građevinskih struktura i materijala. Sve mjere energetske obnove nisu primjenjive na svim zgradama sa statusom kulturnog dobra, no bez obzira na to moguće je povećati energetske učinkovitost svake zgrade sa statusom kulturnog dobra pod uvjetom da je odabrana primjena onih mjera koje nemaju utjecaj na vrijednost i obilježja zgrade na temelju kojih je utvrđeno svojstvo kulturnog dobra.

Prema Veršić i dr. [10], prilikom energetske obnove zgrada sa statusom kulturnog dobra preporuča se, gdje god je to moguće, toplinsku izolaciju postaviti s vanjske strane zida. To je fizikalno najispravniji postupak jer štiti nosivu konstrukciju od smrzavanja, sprječava pojavu neželjenog kondenzata i stvaranja okruženja za razvoj mikroorganizama i gljivica na unutarnjoj strani zida. S obzirom na to da vanjska fasada na zgradama sa statusom kulturnog dobra često predstavlja vrijedan povijesni element, konzervatorski uvjeti često ne dozvoljavaju postavljanje toplinske izolacije s vanjske strane zidova. Postavljanje fotonaponskih sustava na krov ili pročelje zgrada sa statusom kulturnog dobra također je često otežano jer oni moraju biti izloženi sunčevoj svjetlosti, a samim time ne mogu ostati nevidljivi. Zbog toga je odabir moguće lokacije za ugradnju fotonaponskog sustava potrebno usuglasiti sa zahtjevima nadležnog konzervatorskog odjela. Danas postoje rješenja koja omogućavaju postavu fotonaponskih sustava koji su integrirani u crijep, staklo, lim ili neki drugi materijal što doprinosi smanjenju njihove vidljivosti na krovu ili pročelju zgrade.

Rizici uzrokovani klimatskim promjenama nisu dovoljno dobro zastupljeni u postojećoj regulativi [11, 12]. To se posebno odnosi na postojeće Eurokodove. Kao odgovor na ova ograničenja i potrebu prilagodbe zgrada klimatskim promjenama, trenutno je u razvoju druga generacija Eurokodova. Drugom generacijom Eurokodova uvesti će se zahtjevi za procjenu, održavanje i rekonstrukciju postojećih zgrada kako bi se, među ostalim značajkama, osigurala otpornosti i prilagodba na utjecaje klimatskih promjena. Dostupnost klimatskih podataka i podataka o klimatskim rizicima za infrastrukturu i zgrade je poboljšana u posljednjim desetljećima, a tome je pridonijela i uspostava *Copernicus servisa za klimatske promjene* [3] koji je javno dostupan.

Zbog posebnosti zgrada sa statusom kulturnog dobra potrebno je detaljno analiziranje postojećeg stanja takvih građevina te uključivanje više profesionalnih struka. Potrebno je napraviti protokol pregleda zgrada, definirati obrasce za pregled postojećeg stanja i dosadašnjih aktivnosti vezanih na održavanje i obnovu ovakvih zgrada. Nužna je izrada registra zgrada sa statusom kulturnog dobra s pripadajućim klimatskim rizicima i njihovim utjecajem na promatranu građevinu. Nakon što su se identificirali i analizirali štetni utjecaji, potrebno je predložiti mjere kojima bi se smanjio novi utjecaj, odnosno potrebno je iznaći najbolja rješenja za prilagodbu zgrada izloženim klimatskim rizicima s ciljem očuvanja zgrada sa statusom kulturnog dobra koje imaju veliku povijesnu vrijednost.

### 3 Zaključak

U posljednjim desetljećima istraživanja utjecaja klimatskih promjena na zgrade sa statusom kulturnog dobra dovela su do značajnog napretka u pogledu procjene klimatskih rizika, ali ta dostignuća velikim dijelom još uvijek nisu prenesena u praktičnu primjenu. Jedan od mogućih razloga je to što se znanstveni rezultati teško prenose donositeljima politika i odluka u području zaštite i očuvanja kulturne baštine. Spora implementacija i razmjena znanja između znanstvenika i organizacija uključenih u zaštitu i očuvanje kulturne baštine usporavaju razvoj okvira za upravljanje klimatskim rizicima specifičnog za kulturnu baštinu. Osim toga, zaštita kulturne baštine i dalje pati od nedostatka integracije konkretnih mjera u nacionalne planove za prilagodbu klimatskim promjenama. Ovim radom se željelo ukazati na problematiku i staviti naglasak na rizike klimatskih promjena koji utječu na zgrade sa statusom kulturnog dobra te potrebu za prilagodbom ovakvih zgrada novim uvjetima.

### Literatura

- [1] Europska komisija: Tehničke smjernice za pripremu infrastrukture za klimatske promjene u razdoblju 2021. – 2027. (2021/C 373/01), Službeni list Europske unije, 2021.
- [2] Fatorić, S., Seekamp, E.: Evaluating a decision analytic approach to climate change adaptation of cultural resources along the Atlantic Coast of the United States, *Land use policy*, 68 (2017), pp. 254–263.
- [3] European Environment Agency: European Climate Risk Assessment (EEA Report 01/2024). Copenhagen: European Environment Agency, 2024.
- [4] Europska komisija: Jačanje otpornosti kulturne baštine na klimatske promjene. Luxembourg: Ured za publikacije Europske unije, 2022.

- [5] Colette, A.: *Climate Change and World Heritage: Report on Predicting and Managing the Impacts of Climate Change on World Heritage and Strategy to Assist States Parties to Implement Appropriate Management Responses*. Paris: UNESCO World Heritage Centre, 2007.
- [6] Daly, C., Engel Purcell, C., Donnelly, J., Chan, C., MacDonagh, M., Cox, P.: *Climate change adaptation planning for cultural heritage, a national scale methodology*, *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 11 (2021) 4, pp. 313–329.
- [7] O'Brien, G., O'Keefe, P., Jayawickrama, J., Jigyasu, R.: *Developing a model for building resilience to climate risks for cultural heritage*, *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 5 (2015) 2, pp. 99–114.
- [8] Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J. A., Hughes, J. J.: *Climate change impacts on cultural heritage: A literature review*, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12 (2021) 4, pp. 1–29.
- [9] Regionalna energetska-klimatska agencija Sjeverozapadne Hrvatske (REGEA): *Interna dokumentacija*, 2024.
- [10] Veršić, Z., Braun, A., Binički, M., Jonjić, L., Nosil Mešić, M., Ostojić, S., Tropčić Zekan, G.: *Smjernice za energetska obnovu zgrada sa statusom kulturnog dobra*. Zagreb: Ministarstvo kulture i medija, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, 2023.
- [11] Croce, P., Formichi, P., Landi, F., Mercogliano, P., Bucchignani, E., Dosio, A., Dimova, S.: *The snow load in Europe and the climate change*, *Climate Risk Management*, 20 (2018), pp. 138–154.
- [12] Rianna, G., Reder, A., Sousa, M. L., Dimova, S.: *Harmonised procedure to update thermal loads in the Eurocodes. Case study for Italy*, *Climate Services*, 30 (2023), pp. 100391.





# Istraživački okvir za odabir lokacija evakuacijskih skloništa kod prirodnih katastrofa

**Bojan Ožinger**<sup>1</sup>, prof. dr. sc. **Ivica Završki**<sup>2</sup>

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

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

## Sažetak

Evakuacijska skloništa ključna su za zaštitu ljudi u područjima pogođenim katastrofama, minimizirajući gubitke života i povećavajući otpornost zajednica. Planiranje i dodjela skloništa smanjuju ranjivost i uključuju poboljšanje infrastrukture, krizno upravljanje, edukaciju, zakonodavstvo, sustave ranog upozoravanja i strategije oporavka. Međutim, neravnomjerna distribucija skloništa i razlike u gustoći naseljenosti ograničavaju njihovu pristupačnost. Odabir lokacija skloništa temelji se na udaljenosti od katastrofe, pristupu zelenim površinama i kvaliteti zgrada. Članak predlaže istraživački okvir za analizu utjecaja broja stanovnika na odabir lokacije skloništa, s ciljem postavljanja skloništa izvan ranjivih područja kako bi se maksimizirala sigurnost. Studija nudi praktične informacije za buduće planiranje, prevenciju i pripremu za katastrofe.

*Ključne riječi: evakuacijska skloništa, prostorna dostupnost, GIS, smanjenje rizika od katastrofe, potražnja i resursi skloništa, sklonište za hitne slučajeve, odabir lokacije*

## Methodology for selecting emergency shelter locations in natural disasters

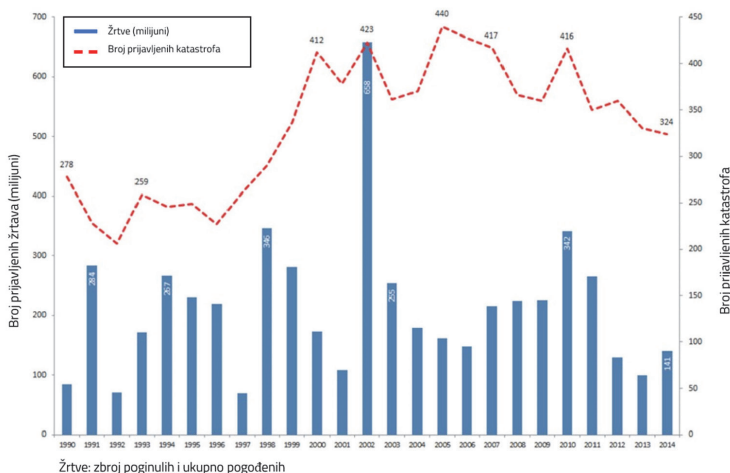
### Abstract

Evacuation shelters are crucial for protecting people in areas affected by disasters, minimizing loss of life and increasing community resilience. Planning and allocating shelters reduce vulnerability and include improving infrastructure, crisis management, education, legislation, early warning systems, and recovery strategies. However, uneven distribution of shelters and differences in population density limit their accessibility. Shelter location selection is based on distance from disaster areas, access to green spaces, and building quality. The article proposes a research framework to analyze the impact of population numbers on shelter location selection, aiming to place shelters outside vulnerable areas to maximize safety. The study offers practical information for future disaster planning, prevention, and preparation.

*Key words: evacuation shelters, spatial accessibility, GIS, disaster risk reduction, shelter demand and resources, emergency shelter, site selection*

## 1 Uvod

Pojavljivanje katastrofa, bilo prirodnih ili antropogenih, kao što su potresi, poplave, oluje, klizišta i ostale, neizbježan je dio naše svakodnevice. One mogu imati razarajuće učinke na društva, što rezultira gubitkom ključne infrastrukture, ekonomske održivosti, i prije svega, gubitkom života. Međutim, ovisno o vrsti i opsegu katastrofe, kao i njezinoj lokaciji, mogu imati različite negativne posljedice [1, 2]. Jedan od prirodnih fenomena čije zanemarivanje će uzrokovati nepopravljivu štetu društvu su potresi i poplave [3, 4]. Globalno se prognozira da će prirodne katastrofe, zbog klimatskih promjena, nastupati sve češće i biti ozbiljnije u bliskoj budućnosti. Pošto se sve više ljudi seli iz ruralnih dijelova u gradove, dolazi do neplanirano velike urbanizacije te porasta koncentracije ljudi i imovine u gradovima, opasnim i ranjivim područjima [5, 6]. U proteklom desetljeću, ekstremni klimatski događaji uzrokovali su ogroman broj smrtnih slučajeva i znatnu ekonomsku štetu. Od 1950. godine broj prirodnih katastrofa kontinuirano raste, a od 1990. godine, u Bazi podataka za upravljanje hitnim situacijama (EMDAT-CRED), prijavljeno je najmanje 15,490 prirodnih katastrofa (Slika 1). Sve navedene katastrofe uzrokovale su više od 32,6 milijuna smrtnih slučajeva, zahvatile su preko osam milijardi ljudi i prouzročile ukupnu štetu od najmanje 3,5 bilijuna američkih dolara na globalnoj razini [7]. Gradovi su ranjiviji na prirodne katastrofe poput potresa i poplava zbog gustoće naseljenosti i ekonomskih aktivnosti u velikim i gustim područjima [8, 9]. Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) definira "katastrofu" kao svaki događaj koji uzrokuje štetu, uništenje, ekološki poremećaj, gubitak ljudskih života, ljudsku patnju, pogoršanje zdravlja i zdravstvenih usluga u mjeri dovoljnoj da opravda izvanredni odgovor izvan pogođene zajednice ili područja [10]. Utjecaj katastrofa na zajednice varira ovisno o sektoru i razini [11, 12], a određen je društvenim, ekonomskim i okolišnim kapacitetima zajednice za prilagodbu [13].



Slika 1. Trend prirodnih katastrofa i broja poginulih [14]

## 2 Upravljanje rizikom kod katastrofa

Upravljanje rizikom kod katastrofa je način sprečavanja novih rizika od katastrofa, smanjenje postojećih rizika i upravljanje preostalim rizicima u svrhu jačanja otpornosti i smanjenja gubitaka [15]. Upravljanje rizikom kod katastrofa označuju dva bitna pojma, a to su: otpornost i ranjivost. Otpornost je sposobnost sustava ili društva izloženog opasnostima da se suprotstavi, prilagodi i oporavi od učinaka opasnosti [15]. Otpornost se oslanja na učinkovito donošenje odluka u svim fazama upravljanja rizikom kod katastrofa: procjena rizika i ranjivosti, planiranje, prevencija i ublažavanje, priprema, odgovor, oporavak, ponovna procjena i revizija. Ranjivost je mjera podložnosti društva, zajednice, sustava ili imovine utjecajima opasnosti zbog fizičkih, socijalnih, ekonomskih i okolišnih čimbenika [15], te odupiranju, prilagodbi ili brzom oporavljanju od posljedica katastrofalnih događaja.



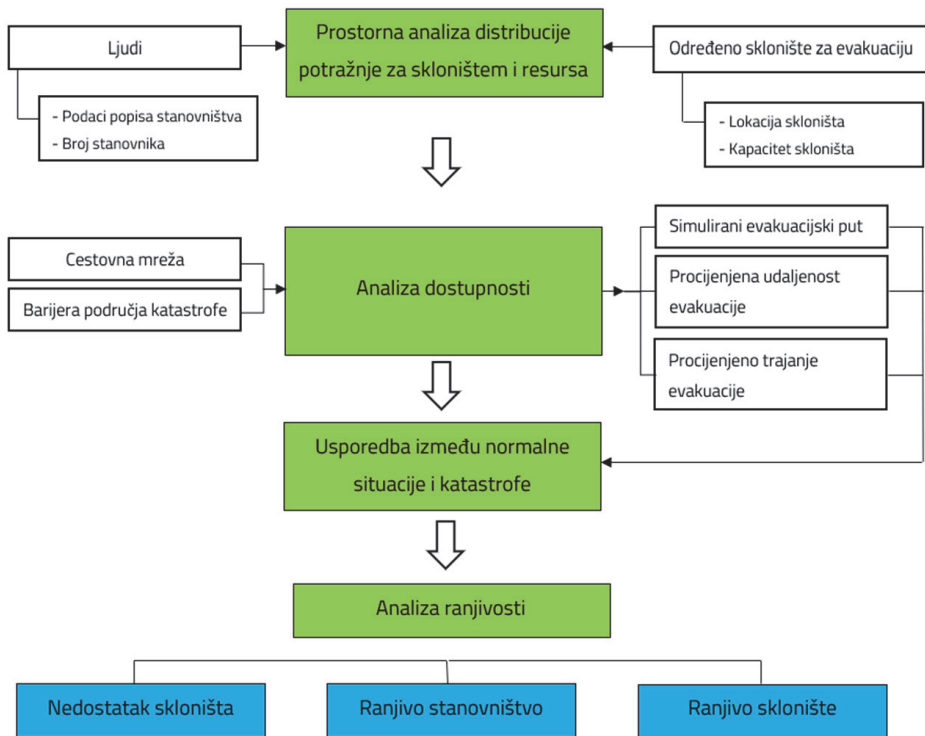
Slika 2. Aktivnosti ublažavanja katastrofa prema svjetskoj zdravstvenoj organizaciji (WHO)

Prilikom izrade projekata, neophodno je uključiti zajednice u proces kako bi se osiguralo zadovoljavanje njihovih potreba i smanjenje specifične ranjivosti. Brojne studije su pokazale da sudjelovanje zajednica u procesima upravljanja rizikom kod katastrofa, posebno u planiranju evakuacijskih skloništa, jača sposobnost zajednica za izgradnju otpornosti, povećanju šanse za njihov uspješan oporavak i dugotraju rehabilitaciju [16, 17].

### **3 Istraživački okvir odabira evakuacijskih skloništa**

U prvom primjeru istraživačkog okvira, učinkovita dodjela skloništa i kvalitetno planiranje evakuacije ovise o lokaciji skloništa, te postotku raspodjele skloništa i populacije. Geografski informacijski sustavi (GIS) su ključni alati koji omogućavaju istraživačima efikasno prikupljanje, analizu i vizualizaciju prostornih podataka. Kroz napredne tehnike kartiranja, GIS tehnologija omogućuje detaljno razumijevanje geografskih obrazaca i trendova, što je ključno za planiranje, upravljanje resursima i donošenje odluka na različitim razinama. Kako bi analiza i procjena planiranja skloništa za katastrofe, te odabir njihove lokacije, bila što točnija i kvalitetnija, predložen je istraživački okvir sa Slike 3. Ranjivost tijekom katastrofe uzrokovana je prostornom heterogenošću neravnoteže između potražnje i kapaciteta resursa. Slika 3. prikazuje istraživački okvir za analizu evakuacije i distribucije skloništa u slučaju katastrofe. Detaljno se bavi procesom analize i planiranja evakuacije u slučaju katastrofe, fokusirajući se na distribuciju skloništa i resursa, analizu dostupnosti, usporedbu između normalnih i kriznih situacija, te analizu ranjivosti, postupak se sastoji od četiri glavna koraka. Prvi korak je prostorna analiza distribucije potražnje za skloništem i resursima, koja sadrži informacije o stanovništvu i skloništim za evakuaciju. Kako bi se dobile potrebne informacije o stanovništvu prikupljaju se i analiziraju demografski podatci iz popisa stanovništva, koji obuhvaćaju podatke kao što su ukupan broj stanovnika, starosna struktura, gustoća naseljenosti, specifične potrebe stanovništva, i slično. Prikupljeni podatci omogućuju točnu procjenu broja ljudi koji bi mogli biti pogođeni katastrofom i kojima će biti potrebna evakuacija i sklonište. Drugi dio koji se odnosi na skloništa za evakuaciju uključuje dva podkoraka. Prvi se odnosi na lokaciju skloništa. Na osnovu prikupljenih demografskih podataka, vrši se identifikacija i mapiranje postojećih skloništa. Ovo uključuje određivanje geografskih lokacija skloništa u odnosu na raspored stanovništva. Kapacitet skloništa, drugi podkorak, predstavlja ključni faktor u planiranju evakuacije jer je važno osigurati da postoji dovoljan broj dostupnih mjesta u skloništim u slučaju katastrofa. Na osnovu ulaznih varijabli, cestovne mreže i barijera područja katastrofe, provodi se drugi korak, odnosno analiza dostupnosti. Analiza cestovne mreže je ključna za identifikaciju postojećih prometnih ruta i infrastrukturnih kapaciteta, s ciljem optimalnog

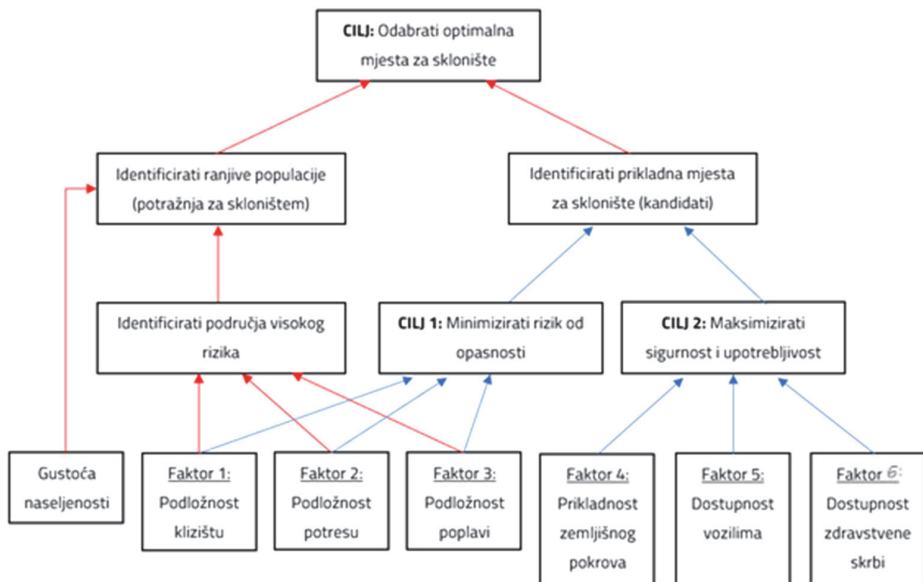
usmjeravanja evakuacije prema skloništim. Uključuje detaljnu evaluaciju glavnih puteva, alternativnih ruta, uskih grla u prometu i drugih relevantnih faktora koji bi mogli utjecati na protok evakuacije. Identifikacija barijera u području katastrofe uključuje prepoznavanje svih prepreka koje bi mogle ometati proces evakuacije, poput poplavljenih puteva, srušenih mostova ili drugih oštećenja infrastrukture uzrokovanih katastrofom. Nakon provedbe analize dostupnosti dobiju se izlazni podatci: simuliranje evakuacijskog puta, procijenjena udaljenost evakuacije i procijenjeno trajanje evakuacije. Proces planiranja evakuacije uključuje simuliranje evakuacijskog puta kako bi se testirala njegova efikasnost i sigurnost. Tijekom simulacije, analiziraju se različiti scenariji, uključujući različite vremenske i prometne uvjete, kako bi se osiguralo da su evakuacijske rute optimalne i da mogu efikasno funkcionirati pod različitim okolnostima. Procjena udaljenosti evakuacije uključuje simulaciju potencijalnih evakuacijskih puteva kako bi se odredila udaljenost koju bi ljudi morali prijeći do najbližeg skloništa. Procijenjeno trajanje evakuacije izračunava se na temelju simulacija, uzimajući u obzir faktore kao što su prometni uvjeti, brzina kretanja ljudi i moguće prepreke na putu. Na temelju dobivenih podataka provodi se treći korak: usporedba između normalne situacije i katastrofe. Analiza uključuje detaljno uspoređivanje uobičajenih prometnih i infrastrukturnih uvjeta s onima tijekom katastrofalnih događaja. Cilj je identificirati kako se dostupnost i efikasnost evakuacijskih ruta mijenjaju u kriznim situacijama. U procesu se procjenjuju faktori kao što su promjene u prometnom opterećenju, oštećenja infrastrukture te moguća ograničenja pristupa važnim putevima. Zadnji korak je analiza ranjivosti koji obuhvaća: nedostatak skloništa, ranjivo stanovništvo i ranjivost skloništa. Analiza nedostatka skloništa uključuje ispitivanje postojanja adekvatnog broja skloništa, te njihove pravilne. Identifikacija ranjivosti stanovništva uključuje prepoznavanje skupina koje su posebno osjetljive tijekom katastrofa, kao što su starije osobe, djeca, osobe s invaliditetom i druge ugrožene grupe. Analiza ranjivosti skloništa temeljito se provodi kako bi se procijenilo njihovo trenutno stanje i sigurnosne karakteristike, s ciljem osiguranja da skloništa mogu adekvatno izdržati učinke katastrofa. Ovaj proces uključuje detaljnu analizu strukturalne integritete svakog skloništa, sposobnost otpornosti na specifične vrste katastrofa (potresi ili poplave), te procjenu opremljenosti i resursa dostupnih unutar skloništa. Za planiranje pripreme za katastrofe i raspodjelu resursa ključno je poznavanje veličine, gustoće i prostorne raspodjele populacije, kao i određenih ili postojećih skloništa za evakuaciju. Problem koji se može pojaviti je taj da se podatci popisa stanovništva obično koriste za određena geografska područja koja su organizirana u velike jedinice kao što su države, regije ili općine, a one imaju ograničenu prostornu preciznost i ne prikazuju stvarnu, promjenjivu raspodjelu stanovništva. Najbolji pokazatelj i način za razumijevanje rezultata popisa stanovništva u određenoj regiji ili području jest razmatranje broja stanovnika po gradskim četvrtima, posebice u odnosu na površinu tih četvrti.



**Slika 3. Istraživački okvir odabira lokacije i planiranja skloništa kod prirodnih katastrofa**

Drugi primjer istraživačkog okvira (Slika 4.) sastoji od dvije faze. Prva faza je prostorno eksplicitna analiza odlučivanja s višestrukim ciljevima za identifikaciju prikladnih lokacija skloništa, dok algoritam za odabir lokacije radi optimizacije izbora među prikladnim lokacijama predstavlja drugu fazu. Algoritam za odabir lokacije skloništa temelji se na prepoznavanju ranjivih populacija i područja s visokim rizikom, te analizi adekvatnih lokacija za skloništa. Glavni cilj je odabrati optimalna mjesta za sklonište. U prvom koraku procesa odabira lokacija za skloništa, ključno je identificirati ranjive populacije. Ova faza obuhvaća dva bitna aspekta: prvi je identifikacija područja visokog rizika, gdje živi znatan broj ranjivih osoba izloženih čestim prirodnim katastrofama; drugi je analiza gustoće naseljenosti, koja pomaže u prepoznavanju područja s velikim brojem stanovnika koji bi u slučaju katastrofe mogli biti najviše pogođeni. Ovi koraci su ključni za preciziranje potreba za skloništima i strateško određivanje njihovih lokacija za efektivnu zaštitu ugroženih skupina. U prvom koraku procesa odabira lokacija za skloništa, analiziraju se faktori rizika povezane s prirodnim katastrofama, koje su vizualno predstavljene crvenim strelicama. Tri ključna faktora rizika su: podložnost klizištu (faktor 1), potresu (faktor 2) i poplavi (faktor 3). Pomoću njih se procjenjuje koliko određeno

područje sklonu klizištima, analizira se rizik od zemljotresa za to područje, te ocjenjujemo mogućnost i opseg poplava. Ova sistematična analiza omogućava da se identificira područja s povećanim rizikom od prirodnih nepogoda, što je ključno za daljnje faze planiranja i postavljanje prioriteta. U drugom koraku procesa odabira lokacija za skloništa ključno je procijeniti faktore sigurnosti i upotrebljivosti, koji su vizualno označeni plavim strelicama. Ovaj korak uključuje tri detaljna faktora: prvo, prikladnost zemljinog pokrova (faktor 4), koja se odnosi na ocjenu kvalitete i stabilnosti zemljišta na kojem se planira izgradnja skloništa, osiguravajući da su strukture sigurne i dugotrajne. Drugo, dostupnost vozilima (faktor 5), što podrazumijeva analizu pristupačnosti lokacije za vozila, ključno za brzu evakuaciju stanovništva i efikasnu dostavu pomoći u kriznim situacijama. Treće, dostupnost zdravstvene skrbi (faktor 6), gdje se procjenjuje blizina i dostupnost medicinskih ustanova koje mogu pružiti neophodnu hitnu pomoć.



**Slika 4. Istraživački okvir odabira optimalnog mjesta za sklonište, plave strelice predstavljaju fazu 1: prikladnost lokacije, a crvene fazu 2: odabir lokacije**

Ovi faktori zajedno omogućavaju odabir lokacija za skloništa koje ne samo da minimiziraju rizike nego i maksimiziraju šanse za brzu reakciju i oporavak u slučaju katastrofe. Na prikazanom dijagramu toka, proces odabira optimalnih lokacija za skloništa strukturiran je u dvije glavne faze, jasno povezane putem crvenih i plavih strelica koje simboliziraju smjerove analize i odlučivanja. Crvene strelice predstavljaju prvu fazu koja se usmjerava na identifikaciju ranjivih populacija i procjenu rizika od prirodnih katastrofa, uzimajući u obzir prva tri faktora uz gu-

stoću naseljenosti, dok plave strelice vode u drugu fazu, koja se fokusira na odabir lokacija za skloništa s ciljem minimizacije izloženosti rizicima, te maksimizacije sigurnosti i pristupačnosti. Svi faktori detaljno se procjenjuje kako bi se osiguralo da su odabrane lokacije skloništa optimalno sigurne i funkcionalne, spremne pružiti zaštitu i podršku u trenucima krize. Ovako organiziran proces omogućava sistematičan pristup planiranju skloništa, s jasnim smjernicama za prioritizaciju lokacija na temelju razina rizika i infrastrukturne pripremljenosti.

## 4 Zaključak

U članku su prikazani i predloženi istraživački okviri za odabir lokacija i planiranja skloništa prilikom prirodnih katastrofa. Istraživački okviri uključuju niz aspekata koje je potrebno analizirati i uzeti u obzir prilikom planiranja smanjenja posljedica prirodnih katastrofa. Prikazani istraživački okviri i reference uvelike mogu pomoći u planiranju, rehabilitaciji, smanjenju posljedica i rizika od katastrofa. U nastavku istraživanja potrebno je izraditi matematičke modele i algoritme povezane s GIS, koji će predložiti i predvidjeti moguće lokacije skloništa u odnosu na elementarnu nepogodu i njezinu lokaciju bilo ona: potres, poplava, odron, oluja, s najbližim pogodnim lokacijama za postavljanje skloništa, postojećih infrastruktura i sadržaja potrebnih za život (bolnice, trgovine i slično). Najbolju lokaciju skloništa, ovisno o prirodnoj katastrofi, moguće je pronaći putem algoritama za odabir lokacija u stvarnom vremenu:

- Dijkstrin algoritam koji se koristi za pronalaženje najkraćih putova,
- OWA (Ordered Weighted Averaging) algoritam koji omogućuje donošenje odluka uzimajući u obzir različite razine rizika u procesu odabira lokacija za hitna skloništa nakon potresa,
- MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) algoritam u kombinaciji s metodama daljinskog istraživanja i terenskih istraživanja za odabir lokacija skloništa u slučaju seizmičkih katastrofa.

Cilj istraživanja je unaprjeđenje procesa odgovora u kriznim situacijama uzrokovanim prirodnim katastrofama i izrade modela koji prilikom izvanredne situacije može vrlo brzo dati pogodne lokacije skloništa.

## Literatura

- [1] Ebert, C.H. Disasters: An Analysis of Natural and Human-Induced Hazards; Kendall Hunt Publishing: Dubuque, IA, USA, 2000.



- [2] Shahpari Sani, D., Heidari, M.T., Tahmasebi Mogaddam, H., Nadizadeh Shorabeh, S., Yousefvand, S., Karpour, A., Jokar Arsanjani, J. An Assessment of Social Resilience against Natural Hazards through Multi-Criteria Decision Making in Geographical Setting: A Case Study of Sarpol-e Zahab, Iran. *Sustainability* 2022, 14, 8304.
- [3] Cuny, F.C. *Disasters and Development*; Intertect Press: Dallas, TX, USA, 1994.
- [4] Alexander, D.E. *Principles of Emergency Planning and Management*; Oxford University Press on Demand: Oxford, UK, 2002
- [5] Rosselló, J.; Becken, S.; Santana-Gallego, M. The effects of natural disasters on international tourism: A global analysis. *Tour. Manag.* 2020, 79, 104080.
- [6] Jha, A.; Brecht, H.; Stanton-Geddes, Z. Building resilience to disasters and climate change in the age of urbanization. In *Disaster Risk Reduction for Economic Growth and Livelihood: Investing in Resilience and Development*; Davis, I., Yanagisawa, K., Georgieva, K., Eds.; Routledge: Abingdon, UK, 2015; pp. 7–27.
- [7] EM-DAT: The International Disaster Database. Available online: <https://public.emdat.be/>
- [8] Zhao, L.; Li, H.; Sun, Y.; Huang, R.; Hu, Q.; Wang, J.; Gao, F. Planning emergency shelters for urban disaster resilience: An integrated location-allocation modeling approach. *Sustainability* 2017, 9, 2098.
- [9] Bayram, V.; Tansel, B.Ç.; Yaman, H. Compromising system and user interests in shelter location and evacuation planning. *Transp. Res. Part B Methodol.* 2015, 72, pp. 146–163.
- [10] World Health Organization (WHO), [Online]. Available: <http://www.who.int/hac/about/definitions/en/>
- [11] Giovene di Girasole, E.; Cannatella, D. Social Vulnerability to Natural Hazards in Urban Systems. An Application in Santo Domingo (Dominican Republic). *Sustainability* 2017, 9, 2043.
- [12] De Silva, M.M.G.T.; Kawasaki, A. Socioeconomic Vulnerability to Disaster Risk: A Case Study of Flood and Drought Impact in a Rural Sri Lankan Community. *Ecol. Econ.* 2018, 152, pp. 131–140.
- [13] United Nations. *The United Nations Office for Disaster Risk Reduction Sendai Framework for Disaster Risk Reduction*; UNDRR: Geneva, Switzerland, 2015
- [14] Guha-Sapir, D., Hoyois, P. and Below, R. : *Annual Disaster Statistical Review 2014, The Numbers and Trends*, Brussels CRED, 2015.
- [15] United Nations. *United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction 2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*; UNDRR: Geneva, Switzerland, 2009

- [16] Ainuddin, S.; Routray, J.K. Community resilience framework for an earthquake prone area in Baluchistan. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2012, 2, pp. 25–36.
- [17] Joerin, J.; Shaw, R.; Takeuchi, Y.; Krishnamurthy, R. Assessing community resilience to climate-related disasters in Chennai, India. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2012, 1, pp. 44–54.

# Primjena neuralnih mreža za predviđanje strukturalnog ponašanja kolničke konstrukcije uslijed djelovanja prometnog opterećenja

Ana Rudeš<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Tatjana Rukavina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TPA d.o.o., ana.rudes@student.grad.hr

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

## Sažetak

Poznavanje strukturalnog i funkcionalnog stanja kolnika od iznimne je važnosti za uspješnost cjelokupnog sustava gospodarenja kolnicima. S obzirom da je današnja tendencija da se podaci o stanju kolnika prikupljaju nerazornim metodama, mjerenje defleksije pomoću uređaja s padajućim teretom postaje sve popularniji način ocjene stanja kolnika. Kako je predviđanje ponašanja kolničke konstrukcije u eksploatacijskom periodu modul od izuzetnog značaja, razvojem tehnologije raste i interes za primjenom umjetne inteligencije, posebice neuralnih mreža. Poznavanjem modela predviđanja ponašanja, postaje moguće predvidjeti trenutak u kojem će biti potrebno izvršiti određenu razinu i oblik intervencije, kako bi se zadržao određeni stupanj sigurnosti i udobnosti prometovanja tijekom dužeg vremenskog razdoblja.

*Ključne riječi: neuralne mreže, kolnička konstrukcija, modeli ponašanja, uređaj s padajućim teretom, nosivost*

## Application of neural networks for predicting the structural behavior of the pavement due to load impact

### Abstract

Knowledge of the structural and functional condition of pavement structure is extremely important for the success of the entire pavement management system. Given that today's tendency is to collect pavement condition data using non-destructive methods, deflection measurement using a falling weight deflectometer device is becoming an increasingly popular method of pavement condition assessment. As the prediction of the behavior of the pavement structure in the exploitation period is a module of exceptional importance, with the development of technology, there is a growing interest in the application of artificial intelligence, especially neural networks. By knowing the pavement behavior prediction model, it becomes possible to predict the moment when it will be necessary to perform a certain level and form of intervention, in order to maintain a certain degree of safety and comfort of traffic over a long period of time.

*Key words: neural networks, pavement structure, pavement performance models, falling weight deflectometer, bearing capacity*

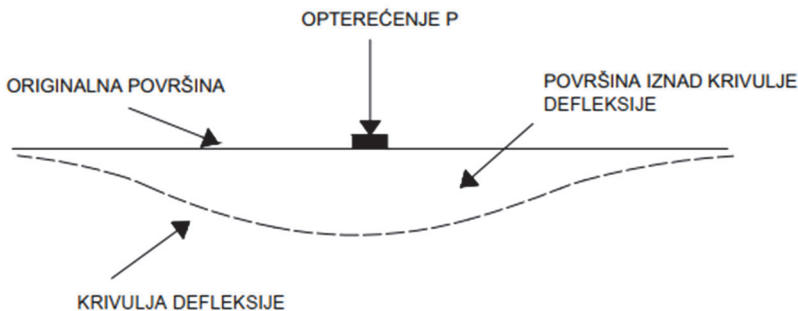
## 1 Uvod

Izgradnja prometne infrastrukture zahtijeva kapitalna ulaganja. Kao i svaki drugi proizvod bez obzira na veličinu početnog ulaganja, unutar predviđenog vijeka uporabivosti, vrijednost prometnice uslijed njene degradacije tijekom uporabnog vijeka postupno pada. Planiranim i pravovremenim poduzimanjem različitih mjera održavanja ili obnove, moguće je proces degradacije kolničke konstrukcije usporiti ili u potpunosti zaustaviti uz utrošak odgovarajućih financijskih sredstava. Nepravovremenim poduzimanjem mjera održavanja, povećava se razina degradacije, izražena kroz opseg i veličinu oštećenja, uslijed čega dolazi do povećanja troškova održavanja, u odnosu na one koji bi bili da se pravodobno pristupilo odgovarajućim mjerama popravaka.

Uspješno, pravodobno poduzimanje mjera održavanja te poznavanje modela strukturalnog i funkcionalnog ponašanja kolničke konstrukcije u funkciji vremena, od iznimne je važnosti. Funkcionalni zahtjevi odnose se na oštećenje površine kolnika, dok se strukturalni povezuju sa nosivošću kolnika, odnosno njegovom sposobnošću da podnesu određeno prometno opterećenje. Izmjerene vrijednosti parametara stanja kolnika moguće je vrednovati na temelju mjerodavnih kriterija, kako bi se ocijenilo stanje pojedinih slojeva ili kolnika u cjelini. Međutim, posjedovanjem podataka o kolniku od trenutka puštanja ceste u promet do danas, moguće je ocijeniti njegovo stanje te predvidjeti ponašanje pod djelovanjem prometnog opterećenja i uvjeta okoline u eksploatacijskom periodu. Kontinuiranim prikupljanjem podataka o napredovanju strukturalnog i funkcionalnog oštećenja tijekom niza godina, moguće je sa dovoljnom točnošću modelirati ponašanje kolnika. Takvi modeli su važni jer omogućavaju predviđanje trenutaka u kojem će određena dionica ceste dosegnuti onaj stupanj strukturalne ili funkcionalne degradacije koji neće zadovoljiti niti sudionike u prometu, a niti cestovne uprave [1]. U svijetu je unatrag posljednjih tridesetak godina uočen problem da postojeće klasično iskustvo u održavanju cesta više nije dostatno te je nužno mijenjati pristup aktivnostima vezanim za to područje. S obzirom da se jasno iskazala potreba za primjenom novih metoda i postupaka u području inženjerstva kolničkih konstrukcija, ubrzanim rastom informatičke tehnologije paralelno raste i interes za primjenom umjetne inteligencije, posebno neuralnih mreža za predviđanje ponašanja kolničke konstrukcije. Prema dosadašnjim istraživanjima neuralne mreže su pokazale visok stupanj točnosti prilikom rješavanja nelinearnih inženjerskih problema [2]. U radu je analizirana mogućnost primjene neuralnih mreža treniranih na bazi podataka dobivenoj terenskim mjerenjima različitih funkcionalnih i strukturalnih oštećenja kolnika. Konačan cilj je prognozirati ocjenu stanja postojećih kolničkih konstrukcija kao i predvidjeti strukturalno ponašanje kolničke konstrukcije u budućem vremenskom periodu.

## 2 Ocjena stanja kolnika

Ocjena stanja kolnika obuhvaća funkcionalnu ocjenu stanja kolnika koja obuhvaća procjenu služnosti i sigurnosti te strukturalnu ocjenu stanja kroz određivanje nosivog kapaciteta kolnika. Strukturalno stanje kolnika ocjenjuje se mjerenjem parametara koji opisuju njegovu nosivost, primjerice mjerenje defleksija kao vertikalne deformacije kolničke konstrukcije nastale uslijed djelovanja opterećenja, a funkcionalno stanje kolnika mjerenjem pokazatelja o uzdužnoj i poprečnoj ravnosti (dubina kolotruga), otpornosti na klizanje (hvatljivost), teksturi te oštećenjima površine [3,4]. Problem se javlja kada zbog pogrešnog određivanja veličina utjecajnih činitelja prilikom projektiranja kolničke konstrukcije ili zbog loše izvedbe, mogu nastati neočekivana trajna oštećenja u kolničkoj konstrukciji tokom eksploatacijskog perioda. Također, postoji mogućnost da potpuna degradacija kolničke konstrukcije u obliku sloma, nastupi prije kraja projektnog perioda. Vrlo je važno ovaj problem uočiti na vrijeme kako bi se određenom obnovom kolničke konstrukcije spriječila daljnja degradacija prometnice. Iz toga razloga podaci dobiveni razornim i nerazornim metodama ispitivanja predstavljaju vrijedan alat za praćenje ponašanja kolnika, donošenje odluka o prioritetima održavanja kao i uspostavljanja sustava gospodarenja kolnicima. Nosivost kolnika obično se određuje kroz ocjenu fizičko-mehaničkih svojstava svakog sloja kolničke konstrukcije, kao što su npr. moduli elastičnosti, umor materijala ili preostala vlačna napreznja. Dvije uobičajene metode za vrednovanje tih parametara su laboratorijska ispitivanja uzoraka dobivenih jezgrovanjem ili iz istražnih jama, dakle razorna ispitivanja, te nerazorna terenska ispitivanja. Obzirom na današnju tendenciju ocjene strukturalnog kapaciteta nerazornim metodama ispitivanja, mjerenje defleksija zbog svoje jednostavnosti, predstavlja uobičajeni pokazatelj strukturalnog ponašanja kolnika. Defleksija kolničke konstrukcije predstavlja elastičnu deformaciju generiranu djelovanjem određenog opterećenja primijenjenog na površinu kolnika, slika 1 [5].



Slika 1. Shema nastale krivulje defleksije [6]

Opće je prihvaćeno načelo da je nosivost kolničke konstrukcije obrnuto proporcionalna defleksiji. Kod ispravno projektirane i izvedene konstrukcije defleksija nije velika i ima elastični karakter, odnosno po rasterećenju progibna linija se vraća u prvobitni položaj. Kod slabih dotrajalih kolnika, defleksija pod opterećenjem je znatno veća, a po rasterećenju se u početni položaj vraća samo dio deformacije (elastična deformacija), dok dio deformacije ostaje (plastična deformacija) [5, 7]. Jedan od najraširenijih nerazornih mjernih uređaja s kojim se određuje strukturalno stanje kolnika jest uređaj s padajućim teretom (**F**alling **W**eight **D**eflectometer). FWD prikazan na slici 2a mjeri defleksije izazvane padajućim teretom koji izaziva impulsno opterećenje kolnika, čije je vrijeme trajanja i veličina opterećenja slična onoj koju izazivaju teška teretna vozila. Tijekom ispitivanja generira se impulsno opterećenje ispuštanjem tereta preko opružnog sustava postavljenog na kružnu ploču, kao što je prikazano na slici 2b [6]. U većini slučajeva mjerenja dobivena FWD-om tumače se sa ciljem identificiranja mehaničkih svojstava pojedinih slojeva kolničke konstrukcije. Mehanička svojstva mogu se zatim koristiti za procjenu naprezanja i deformacija na kolniku, koja se nadalje mogu koristiti za procjenu preostalog životnog vijeka kolničke konstrukcije. Podatke dobivene razornim i nerazornim metodama ispitivanja iznimno je važno kontinuirano prikupljati jer se na taj način stvaraju pretpostavke za približno točno modeliranje ponašanja kolničke konstrukcije.



**Slika 2. Uređaj za ispitivanje defleksija: a) deflektometar s padajućim teretom; b) uvećani prikaz kružne ploče za prijenos opterećenja [5,8]**

Poznavanjem modela predviđanja ponašanja kolnika postaje moguće planirati vrstu intervencije (održavanje, rehabilitacija ili rekonstrukcija kolničke konstrukcije) kao i odrediti optimalni trenutak u kojem je najpogodnije poduzeti određenu vrstu intervencije. Netočan model predviđanja ponašanja uzrokuje pogrešnu raspodjelu financijskih sredstava koji će se utrošiti na obnovu kolničke konstrukcije. Sukladno tome, učinkovit sustav prikupljanja podataka razornim i nerazornim metodama ispitivanja kao i periodična održavanja mrežnih odsječaka, zahtijevaju egzaktno modele predviđanja ponašanja. U konačnici, redovitim primjenom pravilnih postupaka održavanja, kvaliteta služnosti kolničkih konstrukcija raste [9].

### 3 Pregled stanja područja

Pozitivni rezultati primjene neuralnih mreža za procjenu ponašanja postojećeg stanja kolničke konstrukcije, potakli su brojne istraživače na primjenu istih prilikom predviđanja ponašanja kolnika u eksploatacijskom periodu. Umjetne neuralne mreže su, ne samo jedna od prvih metoda strojnog učenja, nego i jedna od najčešće korištenih metoda umjetne inteligencije u građevinarstvu, a posebice u inženjerstvu kolničkih konstrukcija [9].

U radu [10] se navodi nekoliko prednosti koje opravdavaju primjenu umjetnih neuralnih mreža za rješavanje kompleksnih inženjerskih problema: 1) mogućnost predviđanja modela ponašanja koji mogu vrlo dobro aproksimirati nelinearne odnose; 2) posjedovanjem baze podataka postojećih i budućih terenskih mjerenja, moguće je nadograđivati modele predviđanja ponašanja; 3) grupiranje baze podataka bez obzira na količinu dostupnih informacija; 4) podaci prikupljeni in-situ ispitivanjima ne utječu negativno na proces treniranja neuralne mreže. Nahoujy [11] je koristeći FWD, predložio novi model umjetne neuralne mreže za izračunavanje odstupanja vrijednosti defleksija u bilo kojoj proizvoljnoj točki duž cestovne prometnice, kao dopunu i zamjenu eksperimentalnim mjerenjima. Model je razvijen na temelju povratnog širenja pomoću višeslojne percepcijske mreže. Ovaj način modeliranja predstavlja veliki potencijal za optimizaciju tradicionalnih mjerenja u smislu smanjenja troškova terenskih mjerenja kao i značajnu preciznost prilikom planiranja strategije održavanja. Meier [12] je u svom radu istraživao mogućnost primjene neuralnih mreža za proračun modula elastičnosti dobivenih temeljem rezultata izmjerenih defleksija pomoću FWD uređaja. Dinamički odgovor kolničke konstrukcije nastao uslijed djelovanja opterećenja izračunat je korištenjem Greenove funkcije temeljene na formiranju matrice krutosti kolničke konstrukcije. Utvrđeno je da se umjetne neuralne mreže mogu primijeniti za izračunavanje modula elastičnosti kolničke konstrukcije. Abed i dr. [13] su predložili model za predviđanje utjecaja defleksija, temperature i aditiva na krutost asfaltnih mješavina. Za stvaranje modela kombinirana su brojna laboratorijska ispitivanja, različite ulazne varijable, kao i opsežna baza podataka. Istraživanjem su otkrili dobar odnos između stvarnih i očekivanih vrijednosti uslijed čega pretpostavljeni model može s dovoljnom točnošću procijeniti krutost asfaltnih mješavina. Mousa [14] je istraživao uvjete povezanosti između slojeva kolničke konstrukcije na temelju mjerenja defleksija dobivenih pomoću uređaja s padajućim teretom. Temeljem dobivenih rezultata zaključio je da povezanost između slojeva značajno utječe na interpretaciju parametara kao što su moduli elastičnosti generirani povratnom analizom. Razvio je model umjetne neuralne mreže koji omogućava korekciju interpretiranih modula elastičnosti nosivih slojeva na temelju uvjeta povezanosti između slojeva. Predloženi model je pokazao točnost od 95,1%. Pomoću neural-

nih mreža Mosa [15] je predložio model za procjenu oštećenja kolnika kao i model strategije održavanja. Lin i dr. [16] su na temelju podataka o površinskim oštećenjima predvidjeli indeks uzdužne ravnosti (IRI). U svom istraživanju su uočili veliku povezanost između uzdužne ravnosti i pukotina na površini kolničke konstrukcije. Gebely [17] je razvio dva modela za odabir strategije održavanja. Zaključio je da su umjetne neuralne mreže prikladne za ocjenu stanja postojećeg kolnika, kao i predviđanje optimalne strategije održavanja u eksploatacijskom periodu. Thube [18] je predložio četiri modela koja predviđaju stupanj degradacije pojedinih indikatora nosivosti kolničke konstrukcije (pukotine, ljuštenje, uzdužna i poprečna ravnost) na cestama s lakšim prometnim opterećenjem. U svom istraživanju uočio je značajnu povezanost između postojećih i neuralnim mrežama predviđenih oštećenja, što u konačnici rezultira implementacijom predloženih modela za predviđanje ponašanja kolničke konstrukcije u sustave gospodarenja kolnicima. Duckworth i dr. [19] koristili su modele za predviđanje ponašanja kolničkih konstrukcija, uzimajući u obzir različite mjere održavanja na utjecajne činitelje kao što su prometno opterećenje, klimatske okolnosti te okolišni čimbenici. Utvrđeno je da su najrelevantnije rezultate pokazali međunarodni indeks ravnosti (IRI) i indeks stanja kolnika (PCI). Zaključeno je da pretpostavljeni model točno generira ponašanje kolnika čak i kad su statistička mjerenja bila izvan odgovarajućih raspona. Mjere održavanja implementirane su u predviđeni model ponašanja i u konačnici su se pokazale točnima. Ghanizadeh i Ahadi [20] su pomoću neuralnih mreža istraživali kritične deformacije nastale u savitljivim kolničkim konstrukcijama uslijed djelovanja standardnog osovinskog opterećenja. Rezultati su pokazali da primjena neuralnih mreža ima brojne prednosti, poput smanjenja vremena potrebnog za proračun nosivosti, mogućnost predviđanja zamora i preostalog vijeka trajanja kolničke konstrukcije temeljem podataka o poprečnoj ravnosti kolnika. Pomoću neuralnih mreža Domitrović i dr. [2] su ocijenili stanje postojeće kolničke konstrukcije kao i istražili mogućnost primjene istih za definiranje optimalne strategije održavanja. Neuralna mreža s algoritmom unatražne propagacije primijenjena je na duljini od 481,3 km državnih cesta u Osječko-baranjskoj županiji. Rezultati istraživanja su pokazali uspješnost primjene umjetnih neuralnih mreža za potrebe održavanja kolničkih konstrukcija kao i točnost prilikom predviđanja optimalne strategije održavanja. Dosadašnjim pregledom literature vidljivo je da umjetne neuralne mreže imaju veliki potencijal za predviđanje ponašanja kolničke konstrukcije, kao i definiranje optimalne strategije održavanja.



## 4 Zaključak

Svrha ocjene stanja kolnika je prikupljanje podataka o fizičko-mehaničkim svojstvima kolnika koja opisuju njegovo ponašanje te njihovo iskazivanje kroz određene pokazatelje. Ocjena strukturalnog ponašanja kolničke konstrukcije je relativno složen zadatak, zbog različitih ulaznih varijabli koje otežavaju cjelokupno analiziranje nosivosti (npr. debljina slojeva, prometno opterećenje, nosivost podloge, vremenski uvjeti). Iz toga razloga, razvoj predviđajućih modela ponašanja predstavlja veliki izazov. Sa ciljem rješavanja nelinearnih inženjerskih problema koji se javljaju u kolničkim konstrukcijama, primjena strojnog učenja, posebice neuralnih mreža prema dosadašnjim istraživanjima se pokazala kao kvalitetno rješenje. Većina tih istraživanja odnosi se na predviđanje ponašanja i preostalog vijeka trajanja kolničke konstrukcije ili na temelju funkcionalnih svojstava kolničke konstrukcije ili na temelju strukturalnih svojstava. Za stvaranje egzaktnog modela ponašanja kolničke konstrukcije potrebno je poznavati parametre i funkcionalne i strukturalne nosivosti, te iskoristiti informacije i podatke dobivene razornim i nerazornim metodama ispitivanja. Posebnu pažnju treba posvetiti stvaranju modela koji opisuju postojeće stanje kolničke konstrukcije, a u konačnici predstavljaju neophodan parametar za procjenu preostalog vijeka trajanja. U daljnjim istraživanjima, osim predviđanja strukturalnog ponašanja kolničke konstrukcije, trebalo bi se usredotočiti na stvaranje modela koji će moći inicirati strategiju održavanja. Prednost buduće formirane neuralne mreže koja će obrađivati informacije iz cestovne baze podataka bila bi u tome, što bi mreža, za bilo koji pridodani set novih ulaznih podataka (npr. novo izmjerene vrijednosti defleksija, dubine kolotraga...) sa visokim stupnjem pouzdanosti trebala inicirati ocjenu stanja kolnika na osnovu pravila koje je naučila u prethodnom procesu učenja. Konačnim implementiranjem neuralnih mreža u sustav gospodarenja kolnicima može se dobiti kvalitetni pomoćni alat za donošenje odluke oko usvajanja određene strategije održavanja kolnika za svaku promatranu dionicu ceste [10]. Ovakav rezultat mogao bi poticati umrežavanje industrije, znanosti i politike. Primjena inteligentnih sustava u upravljanju prometnom infrastrukturom očituje se u pružanju pouzdanijih informacija uz manje troškove kao i u razvoju ekonomičnog sustava gospodarenja infrastrukturom.

## Literatura

- [1] Dragovan, H. (2011). Application of neural network in pavement management, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb.
- [2] Domitrović, J., Dragovan, H., Rukavina, T., Dimter, S.: Application of an Artificial Neural Network in Pavement Management System, Tehnički vjesnik, vol. 25, br.2, str. 466-473. (2018). <https://doi.org/10.17559/TV-20150608121810>

- [3] Cuculić, M., Pranjić, I., Tibljaš, A.D., Stanić, I.: Analiza asfaltnih kolničkih konstrukcija na temelju podataka strukturalne nosivosti, Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci), vol. 23, br. 1, str. 41-55, 2020. <https://doi.org/10.32762/zr.23.1.3>
- [4] Faheem, H.B., Mahmoud, A.A., Hashem, M.D., Moez, M.A.: Modeling of Pavement Maintenance Decisions Using Artificial Intelligence Based on Maintenance Unit, Mansoura Engineering Journal, vol.47, br.3, str. 10-21, 2022. DOI: 10.21608/bfemu.2022.243943
- [5] Rukavina, T.: Korištenje deflektografa s padajućim teretom i georadara za utvrđivanje postojeće i projektiranje potrebne nosivosti kolnika, Seminar Asfaltni kolnici, Zagreb 2014.
- [6] Pierce, L.M., Bruinsma, J.E., Smith, K.D., Wade, M. J., Chatti, K., Vandenbossche, J.M.: Using Falling Weight Deflectometer with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, vol.3, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, New Jersey, 2017.
- [7] Babić, B.: Projektiranje kolničkih konstrukcija, Zagreb, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, 1997.
- [8] Dynatest-Fast Falling Weight Deflectometer, [www.airport-suppliers.com/product/fast-falling-weight-deflectometer/](http://www.airport-suppliers.com/product/fast-falling-weight-deflectometer/)
- [9] Marcelino, P., Antunes, M.D., Fortunato, E., GAOMES, M.C.: Machine learning approach for pavement performance prediction, International Journal of Pavement Engineering, vol. 22, br.3, str. 341-354, 2019. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1609673>
- [10] Plati, C., Georgiou, P., Papavasiliou V.: Simulating pavement structural condition using artificial neural networks, Structure and Infrastructure Engineering, vol. 12, br. 9, 2016. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1086384>
- [11] Nahoujy, M.R.: An Artificial Neural Network approach to model and predict asphalt deflections as a complement to experimental measurements by Falling Weight Deflectometer, Doctoral Thesis, Faculty of Infrastructure and Environmental Engineering Ruhr-Universität Bochum, Germany, 2020, <https://d-nb.info/1212664256/34>
- [12] Meier, R.W., Rix, G.J.: Backcalculation of Flexible Pavement Moduli From Dynamic Deflection Basins Using Artificial Neural Networks, Transportation Research Record, br. 1473, str. 72-81, 1995.
- [13] Abed, M.A., Taki, Z.N.M., Abed, A.H.: Artificial neural network modeling of the modified hot mix asphalt stiffness using Bending Beam Rheometer, Materials Today, vol. 42, br. 5, str. 2584–2589, 2021. DOI:10.1016/J.MATPR.2020.12.583

- [14] Mousa, M., Elseifi, M.A., Omar, E., Mohammad, L.N.: Evaluation of interface bonding conditions based on non-destructing testing deflection measurements, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, br. 3, 2017, <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1400995>
- [15] Mosa, A. M.: Neural network for flexible pavement maintenance and rehabilitation, *Applied Research Journal*, vol. 3, br.4, str. 114-129, 2017.
- [16] Lin, J., Yau, J., Hsiao, L.: Correlation analysis between international roughness index (IRI) and pavement distress by neural network, 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, str. 12-16, 2003.
- [17] Gebely, H.R.: Pavement maintenance decision model using artificial neural networks, Masters Thesis, Faculty of Engineering, Fayoum University, Egypt, 2015.
- [18] Thube, D.T.: Artificial neural network (ANN) based pavement deterioration models for low volume roads in India, *International Journal of Pavement Research Technology*, vol. 5, br. 2, str. 115., 2012.
- [19] Duckworth, P., Yasarer, H., Najjar, Y.: Evaluation of Flexible Pavement Performance Models in Mississippi: A Neural Network Approach, *Advances in Transportation Geotechnics IV*, str. 179-190, 2021.
- [20] Ghanizadeh, A.R., Ahadi, M.R.: Application of Artificial Neural Networks for Analysis of Flexible Pavements under Static Loading of Standard Axle. *International Journal of Transportation Engineering*, vol.3, br. 1, str. 31-43, 2015.



# Carbon curing of concrete: process overview and concrete properties

Valentina Mustapić<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Marijana Serdar<sup>2</sup>

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

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

## Abstract

In response to the pressing problem of climate change caused by high greenhouse gas emissions from industrial processes, the European Union has set itself ambitious targets with the European Green Deal to achieve net-zero greenhouse gas emissions by 2050. The cement industry alone is responsible for 5 to 7 % of these emissions. One of the EU's strategies to reduce uncontrolled CO<sub>2</sub> emissions is the capture and utilisation of CO<sub>2</sub>. This article provides a comprehensive overview of the carbon curing process, focussing on the mechanical properties and durability of carbon cured concrete. It examines the effects of various parameters such as CO<sub>2</sub> concentration, exposure time and concrete mix composition on optimising these properties to improve the process and effectively control changes in the properties of concrete products.

*Ključne riječi: carbon curing, mechanical properties, durability properties, accelerated carbonation*

## Njegovanje betona ugljikovim dioksidom: pregled procesa i svojstava

### Sažetak

Kao odgovor na hitan problem klimatskih promjena uzrokovanih visokim emisijama stakleničkih plinova iz industrijskih procesa, Europska unija postavila je ambiciozne ciljeve s Europskim zelenim planom kako bi postigla nulte emisije stakleničkih plinova do 2050. godine. Sama cementna industrija odgovorna je za 5 do 7 % tih emisija. Jedna od strategija EU za smanjenje nekontroliranih emisija CO<sub>2</sub> je hvatanje i korištenje CO<sub>2</sub>. Ovaj članak pruža sveobuhvatan pregled procesa karbonizacije betona, s naglaskom na mehanička svojstva i trajnost karboniziranog betona. Ispituje učinke različitih parametara kao što su koncentracija CO<sub>2</sub>, vrijeme izlaganja i sastav betonske smjese na optimizaciju tih svojstava kako bi se poboljšao proces i učinkovito kontrolirale promjene u svojstvima betonskih proizvoda.

*Key words: njegovanje betona ugljičnim dioksidom, mehanička svojstva, trajnosna svojstva, ubrzana karbonizacija*

## 1 Introduction

Climate change is a consequence of increasing greenhouse gas emissions. The 2018 EU directive "A Clean Planet for All" [1] predicts climate change for all EU regions, Mediterranean, continental and mountain regions. With strategies such as the Green Deal [2] and the Paris Agreement [3], the EU aims to achieve climate neutrality by 2050. The construction industry is responsible for 40 % of total CO<sub>2</sub> emissions [4], i.e. around 15 gigatonnes per year [4], and around 10 billion tonnes of waste [5]. Every day, 198.000 tonnes of concrete waste are produced, 95 % of which is used as aggregate for new concrete [6]. Annual cement production amounts to 4.1 billion tonnes [7], which accounts for around 5–7 % of total CO<sub>2</sub> emissions [8]. The high greenhouse gas emissions in cement production are due to the high temperatures (approx. 1450 °C) and the calcination process of the limestone.

The cement industry is still considered "hard to abate", but progress is being made through various strategies such as reducing the amount of clinker in cement through mineral additives, continuously improving energy efficiency, switching to low-carbon fuels and better utilisation of materials. Currently, the greatest efforts to reduce emissions are being invested in new technologies for carbon capture and storage (CCS) and utilisation (CCU). CCS captures and stores CO<sub>2</sub> from emission sources, while CCU utilises the CO<sub>2</sub> to produce useful materials or products. It is estimated that the EU will be able to capture at least 320 million tonnes of CO<sub>2</sub> by 2050, of which 55 % will be used in products and the rest will be stored [9]. A particular focus is on the integration of captured CO<sub>2</sub> into the production process of concrete. It is estimated that by 2050, 0.1–1.4 gigatonnes of CO<sub>2</sub> could be used in this way instead of being released into the atmosphere [10]. The aim of this manuscript is to give a comprehensive overview of the possibilities for achieving equivalent or even better mechanical properties of CO<sub>2</sub>-treated concrete, known as carbon curing.

## 2 Process of concrete carbon curing and properties of final product

Weathering carbonation differs from the carbonation hardening of concrete. Weathering carbonation is a process that occurs naturally over time in hardened concrete. During this process, atmospheric CO<sub>2</sub> reacts with hydration products of the concrete, such as calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>), to form calcium carbonate. Curing with CO<sub>2</sub> is a process that aims to simultaneously reduce emissions and produce concrete products with satisfactory mechanical and durability properties by exposing the concrete to high concentrations of CO<sub>2</sub>. Carbon curing results in the formation of C-S-H gel and calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) as a product of the

reaction between  $\text{CO}_2$  and the calcium silicates in the Portland cement [11]. The curing process is critical in concrete production as it controls moisture loss to achieve the desired mechanical and physical material properties. The use of  $\text{CO}_2$  for cement activation offers an alternative to the traditional curing methods using water or steam proposed by Berger in the 1970s [12]. Portland cement contains 80 % calcium silicates [13], with alite ( $\text{C}_3\text{S}$ ) and belite ( $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ) predominating. Alite is the predominant mineral in clinker, which is crucial for the development of cement strength, although cement production consumes a significant amount of lime and requires higher sintering temperatures, which increases production costs. In contrast to  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  does not require higher sintering temperatures and the amount of lime used in the production of  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  cements is lower, making  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  an investigated alternative to reduce emissions. The disadvantages of belite include its lower hydration activity compared to alite, resulting in a slower reaction with water, which can lead to a longer time to reach the desired strength of the cementitious mass and lower early strength. The early-age carbon curing process of concrete is described by equations 1-4 [14].



The reaction of calcium silicates with  $\text{CO}_2$  is faster than hydration, in which calcium silicates react with water to form hydrate products, which are responsible for the strength of the concrete. Under conditions where  $\text{CO}_2$  is present, carbonation can begin before hydration, which allows for faster development of concrete strength than hydration alone [15]. This process is very complex due to many influencing factors such as water-binder ratio, pre-curing, pressure,  $\text{CO}_2$  concentration, preparation, concrete raw materials, etc.

## 2.1 Laboratory process of carbon curing of concrete

The laboratory process of  $\text{CO}_2$  curing of concrete consists mainly of 3 phases: pre-curing, carbonation and post-curing [16]. Pre-curing involves curing in and outside the mould at 20-25 °C and 40-60 % relative humidity [17]. In-mould curing takes place after the concrete mix has been placed to ensure that it hardens before demoulding. During demoulding, the samples are removed from the mould to increase the water evaporation surface and allow better  $\text{CO}_2$  diffusion

during the carbonation phase. The w/s ratio is crucial, because too much water can hinder the diffusion of CO<sub>2</sub>, while too little can stop the reaction. A higher w/s ratio is usually used in the pre-curing phase as there is a continuous loss of water during demoulding curing, which leads to increased CO<sub>2</sub> uptake in later phases, but this stabilises once 40 % of the water has been consumed [17]. The carbonation phase is the phase in which the concrete is exposed to CO<sub>2</sub> and there are two types of reaction systems: enclosed and flowable chambers. The enclosed system is more efficient as it can withstand higher partial pressures of CO<sub>2</sub>. Due to precise control, laboratory experiments are performed in enclosed chambers where samples are usually exposed to CO<sub>2</sub> at a pressure of 1 to 5 atm, where the influence of temperature and relative humidity is very important. The preferred temperature is between 20 and 25 °C, the relative humidity between 60 and 70 % [17]. Post-curing after carbonation allows further hydration of the remaining unreacted hydraulic phases. It is important to compensate for the lack of water caused by the pre-curing process and carbonation in order to ensure the hydraulic reaction and thus higher strength.

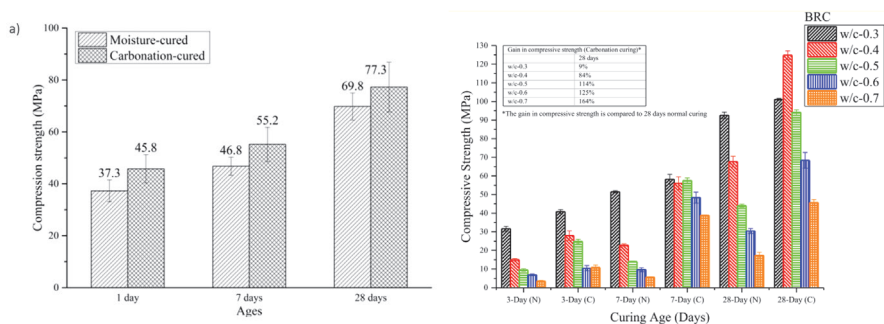
## **2.2 Mechanical properties of carbon-cured concrete**

Exposing concrete to high levels of CO<sub>2</sub> under controlled conditions aims to accelerate the natural process of carbonation, achieve maximum storage of CO<sub>2</sub> within concrete, but also aims to create a building material with improved mechanical and durability properties. This approach has already proven successful in the treatment of various types of binders, including those based on classical Portland cement [18, 19], calcined limestone and sand [20] as well as concrete with recycled aggregates [21].

The compressive strength of carbon-cured concrete depends largely on the water-cement ratio, the porosity and the properties of the coarse aggregate [22]. In their work, Li et al. compared CO<sub>2</sub>-treated concrete with moisture-cured concrete and concluded that the compressive strength of CO<sub>2</sub>-treated concrete is 10 % higher than that of moisture-cured concrete of the same age (see Figure 1) [22]. Concrete with carbonated recycled aggregate has a higher compressive strength than concrete with non-carbonated recycled aggregate and is capable of absorbing 7.9 kg CO<sub>2</sub> per tonne of aggregate [23]. An 11.8 % increase in the volume of the solid phase in concrete with recycled aggregate indicates a higher density and a stronger structure [23]. Monkman et al. [24] compared the effects of conventional accelerating admixtures and CO<sub>2</sub> on the durability properties of concrete and on its fresh and hardened concrete properties. When testing different doses of CO<sub>2</sub>, they found that the optimum dose reduced the setting time by 40 % and increased the compressive strength after one and three days by 14 % and 10 % respectively. It was found that CO<sub>2</sub> injection accelerated hydration,



shortened setting time and increased the strength of the concrete, while having no negative effect on durability. The average acceleration of the setting time was 25 %, while the final setting was accelerated by 23 %. Economically, the use of  $\text{CO}_2$  as an accelerator is more cost-effective compared to conventional accelerators. Tiefeng Chen et al. [25] investigated the influence of pre-curing and carbonation time on the properties of the cement paste, focusing on compressive strength and microstructure. The results show that hydration and carbonation reduce the porosity of the cement paste, with carbonation reducing the larger pores and hydration reducing the smaller pores. The research results show that carbonation increases the strength of the hardened cement paste in the initial phase, but that this influence decreases over time. The optimum pre-hardening time is reached when 30-40 % of the water has been lost from the cement paste. It should be noted that the longer the carbonation time, the shorter the recommended pre-hardening time. The results also suggest that the hydration reaction rate can be reduced during the carbonation process as a carbonate layer forms on the cement surface, which acts as a barrier to further hydration. In addition, competition for available calcium ions may slow hydration, and higher  $\text{CO}_2$  concentration may slow hydration as it may bind calcium ions destined for hydration. Salman Siddique et al. [26] investigated the influence of the water-cement ratio on the physico-chemical and microstructural properties of high-belite cement during carbonate curing. The results show that an increase in the water-cement ratio increases  $\text{CO}_2$  absorption, promotes the consumption of the belite phase and facilitates calcite formation. A higher water-cement ratio leads to a higher compressive strength, which indicates a more intensive carbonation and microstructural compaction.



**Figure 1. a) Compressive strength of carbonation-cured and moisture-cured samples [27], b) Compressive strength of normally cured and carbonation cured belite-rich cement with varying water to cement values [26]**

### 2.3 Durability properties of carbon-cured concrete

Previous studies reported reduced porosity of carbon-cured concrete, which protects against the penetration of chloride ions, increased resistance to harmful external influences such as sulphates and acids and reduced weather-related abrasion and damage caused by freezing and thawing [15]. However, the corrosion resistance of steel in carbonated concretes remains a challenge [27]. Previous studies have shown that the reaction of  $\text{CO}_2$  and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , during the carbonation process leads to a drop in pH. Some studies suggest that prolonged exposure to  $\text{CO}_2$  increases the resistance to chloride penetration as the porosity decreases due to the hydration reaction and the denser microstructure [28]. The conclusion from the research by Zhang et al. [14] is that carbonation in the early stage of concrete can be beneficial. Carbonation lowers the surface pH to 9.2 but keeps the core pH above 12. Subsequent hydration raises the surface pH to above 12.3, making the surface of the concrete less permeable and more resistant to weathering carbonation. This process enables the development of a layered structure with a carbonate layer on the surface, which improves the strength and durability of the concrete. On the other hand, although the pH value can partially recover to values above 12 with suitable post-curing hydration, a lower  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content makes the concrete more susceptible to corrosion due to ageing carbonation during its service life [17]. Lower pH conditions also promote the mobility of chloride ions by reducing the binding capacity and thus facilitating their transport into the concrete. While previous research indicates accelerated corrosion of steel at reduced pH, experience shows that lowering pH alone is not sufficient to cause significant steel corrosion in concrete, since the occurrence of several other parameters is needed [29]. Nevertheless, long-term durability of carbon-cured concrete remains important question for further real scale application.

## 3 Conclusion

Tackling climate change requires urgent action to reduce greenhouse gas emissions, particularly in industries such as construction that contribute significantly to  $\text{CO}_2$  emissions. The introduction of carbon curing techniques in concrete production is a promising way to reduce emissions while improving material properties. It is estimated that up to 1.4 gigatonnes of  $\text{CO}_2$  could be sequestered in concrete by 2050, contributing to global efforts to reduce emissions. Research shows that optimising  $\text{CO}_2$  dosage can reduce setting times, increase initial and final strength and improve cost efficiency compared to conventional accelerators. Among the many benefits of carbonation, one of the biggest challenges is ensu-

ring corrosion resistance. While previous research indicated accelerated corrosion of steel in concretes with reduced pH, experience shows that pH reduction alone is not sufficient to achieve corrosion and that parameters such as changes in moisture over time, depth of cover and the microstructure and chemical composition of the pores in the carbonated matrix at the interface between steel and concrete are much more important. Further research is needed to better understand the relationship between the macroscopic properties and the microstructure of the material in order to optimise the CO<sub>2</sub> curing process and control changes in concrete properties.

## Acknowledgment

Authors acknowledge the support of the project “Active storage of captured CO<sub>2</sub> in net zero construction products – ASSCENT”, which has received funding from the European Union’s Horizon Europe programme under grant agreement no. 101159895.

## Literature

- [1] A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, n.d. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX %3A52018DC0773](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0773) (accessed May 14, 2024).
- [2] European Green Deal, (n.d.). [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (accessed January 5, 2024).
- [3] The Paris Agreement, (n.d.). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (accessed January 5, 2024).
- [4] Scaling Low-Carbon Design and Construction with Concrete: Enabling the Path to Net-Zero for Buildings and Infrastructure, 2023.
- [5] J.H. Aquino Rocha, R.D. Toledo Filho, The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: A systematic literature review, *Journal of Building Engineering* 76 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107319>.
- [6] J. Yoo, H. Shin, S. Ji, An eco-friendly neutralization process by carbon mineralization for Ca-rich alkaline wastewater generated from concrete sludge, *Metals (Basel)* 7 (2017). <https://doi.org/10.3390/met7090371>.
- [7] E.A. Khalil, M.N. AbouZeid, Computation of the environmental performance of ready-mix concrete for reducing CO<sub>2</sub> emissions: A case study in Egypt, *Energy Reports* 9 (2023) 144–148. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.125>.

- [8] W. Ashraf, J. Olek, Carbonation behavior of hydraulic and non-hydraulic calcium silicates: potential of utilizing low-lime calcium silicates in cement-based materials, *J Mater Sci* 51 (2016) 6173–6191. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9909-4>.
- [9] Sapart Célia, Perimenis Anastasios, Bernier Tudy, The contribution of carbon capture and utilisation towards climate neutrality in Europe, (2023).
- [10] D. Ravikumar, D. Zhang, G. Keoleian, S. Miller, V. Sick, V. Li, Carbon dioxide utilization in concrete curing or mixing might not produce a net climate benefit, *Nat Commun* 12 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21148-w>.
- [11] M. Liu, S. Hong, Y. Wang, J. Zhang, D. Hou, B. Dong, Compositions and microstructures of hardened cement paste with carbonation curing and further water curing, *Constr Build Mater* 267 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121724>.
- [12] J.F.Y. & K.L. R. L. BERGER, Acceleration of Hydration of Calcium Silicates by Carbon Dioxide Treatment, *Nature Physical Science* 240 (1972) 16–18.
- [13] Y. Fang, J. Chang, Rapid hardening  $\beta$ -C<sub>2</sub>S mineral and microstructure changes activated by accelerated carbonation curing, *J Therm Anal Calorim* 129 (2017) 681–689. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6165-z>.
- [14] D. Zhang, Y. Shao, Early age carbonation curing for precast reinforced concretes, *Constr Build Mater* 113 (2016) 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.048>.
- [15] Y.C. Wang, M.G. Lee, W.C. Wang, Y.C. Kan, S.H. Kao, H.W. Chang, CO<sub>2</sub> Curing on the Mechanical Properties of Portland Cement Concrete, *Buildings* 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/buildings12060817>.
- [16] Z. Liu, W. Meng, Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 44 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101428>.
- [17] D. Zhang, Z. Ghoulah, Y. Shao, Review on carbonation curing of cement-based materials, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 21 (2017) 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.003>.
- [18] B. Guo, G. Chu, R. Yu, Y. Wang, Q. Yu, D. Niu, Effects of sufficient carbonation on the strength and microstructure of CO<sub>2</sub>-cured concrete, *Journal of Building Engineering* 76 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107311>.
- [19] Y. Xu, X. Liang, C. Wan, H. Yang, X. Feng, Carbonation and related behaviors of hardened cement pastes under different hydration degrees, *Cem Concr Compos* 140 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105079>.
- [20] X. Chang, S. Liu, C. Zhang, P. Shen, D. Xuan, X. Guan, C. Shi, Carbonation-hardening properties and ITZ microstructure of low-calcium CO<sub>2</sub> sequestration binder mortar, *Constr Build Mater* 336 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127589>.

- [21] C. Moro, V. Francioso, M. Lopez-Arias, M. Velay-Lizancos, CO<sub>2</sub> curing of mortar with natural and recycled concrete aggregate: An environmental and economic assessment, *Constr Build Mater* 399 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132587>.
- [22] V.W. Tam, A. Butera, K.N. Le, Mechanical properties of CO<sub>2</sub> concrete utilising practical carbonation variables, *J Clean Prod* 294 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126307>.
- [23] M. Hanifa, R. Agarwal, U. Sharma, P.C. Thapliyal, L.P. Singh, A review on CO<sub>2</sub> capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 67 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102292>.
- [24] S. Monkman, M. MacDonald, R.D. Hooton, P. Sandberg, Properties and durability of concrete produced using CO<sub>2</sub> as an accelerating admixture, *Cem Concr Compos* 74 (2016) 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.007>.
- [25] T. Chen, X. Gao, Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 34 (2019) 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.034>.
- [26] S. Siddique, A. Naqi, J.G. Jang, Influence of water to cement ratio on CO<sub>2</sub> uptake capacity of belite-rich cement upon exposure to carbonation curing, *Cem Concr Compos* 111 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103616>.
- [27] Z. Li, Z. He, X. Chen, The performance of carbonation-cured concrete, *Materials* 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12223729>.
- [28] H. Hamada, A. Alattar, B. Tayeh, F. Yahaya, I. Almeshal, Influence of different curing methods on the compressive strength of ultra-high-performance concrete: A comprehensive review, *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01390>.
- [29] U. Angst, F. Moro, M. Geiker, S. Kessler, H. Beushausen, C. Andrade, J. Lahdensivu, A. Köliö, K.I. Imamoto, S. von Greve-Dierfeld, M. Serdar, Corrosion of steel in carbonated concrete: Mechanisms, practical experience, and research priorities – A critical review by RILEM TC 281-CCC, *RILEM Technical Letters* 5 (2020) 85–100. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.127>.



# Proračun duktilnosti proizvoljnih armiranobetonskih presjeka opterećenih uzdužnom silom i momentom savijanja

Hrvoje Čagalj<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Mario Uroš<sup>2</sup>

<sup>1</sup>cagalj1992@gmail.com

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

## Sažetak

Osiguranje dostatne duktilnosti presjeka armiranobetonskih zidova je uz dovoljnu otpornost na unutarnje sile nužan uvjet sigurnosti građevina za vrijeme djelovanja potresa. U radu je opisana metoda za proračun duktilnosti presjeka. Metoda se temelji na podjeli presjeka na dijelove i iterativnom određivanju visine tlačnog područja. Opisanom metodom moguće je analizirati složene presjeke, presjeke sastavljene od ovijenih i neovijenih dijelova presjeka i armirane proizvoljnom armaturom. Opisan je postupak podjele presjeka i proračuna zakrivljenosti presjeka. Navedene su prednosti i nedostaci metode i napravljena je analiza triju presjeka. Rezultati analize su uspoređeni s primjerima iz dostupne literature i paralelnom analizom u SAP2000.

*Ključne riječi: armiranobetonski zidovi, duktilnost presjeka,  $M - \varphi$  dijagram, zidovi proizvoljnih poprečnih presjeka*

## Calculation of ductility of reinforced concrete sections

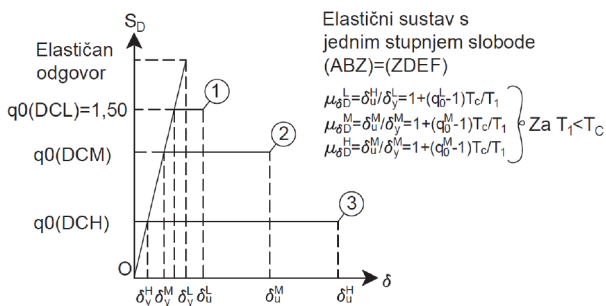
### Abstract

Providing sufficient ductility of reinforced concrete wall sections, along with adequate resistance to internal forces, is necessary for the safety of buildings during seismic excitation. This paper describes a method for calculating the ductility of sections. The method is based on dividing the section into segments and iteratively determining the height of the compression zone. With this method, it is possible to analyze complex sections, including those composed of confined and unconfined parts, and reinforced with arbitrary reinforcement. The procedure for dividing the section and calculating the curvature of the section is described. The advantages and disadvantages of the method are listed, and an analysis of three sections is conducted. The results of the analysis were compared with examples from the available literature and with a parallel analysis in SAP2000.

*Key words: reinforced concrete walls, section ductility,  $M - \varphi$  diagram, walls with arbitrary cross-sections*

## 1 Uvod

Važeća norma HRN EN 1998 [1] dopušta smanjenje proračunskih potresnih sila uporabom faktora ponašanja  $q$ . Kako bi se ostvarili zahtijevani pomaci građevine tijekom djelovanja potresa, građevine proračunate na umanjene potresne sile moraju imati sposobnost deformiranja u plastičnom području [2], slika 1.



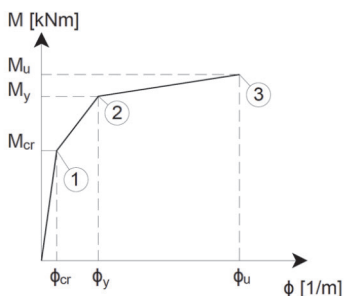
Slika 1. Odnos proračunske sile i zahtijevane duktilnosti za građevine s osnovnim periodom  $T_1 < T_c$  [2]

Sposobnost deformiranja konstrukcije u plastičnom području se naziva duktilnost konstrukcije [2]. Prema HRN EN 1998-1 [1] provjera dostatne duktilnosti konstrukcije je dana vezom između osnovne vrijednosti faktora ponašanja  $q_0$  i zahtijevanog koeficijenta duktilnosti s obzirom na zakrivljenost presjeka  $\mu_\varphi$  izrazom (1):

$$\mu = 2q_0 - 1 \quad \text{ako je} \quad T_1 \geq T_c \quad (1)$$

$$\mu_\varphi = 1 + (2q_0 - 1)T_1/T_c \quad \text{ako je} \quad T_1 < T_c$$

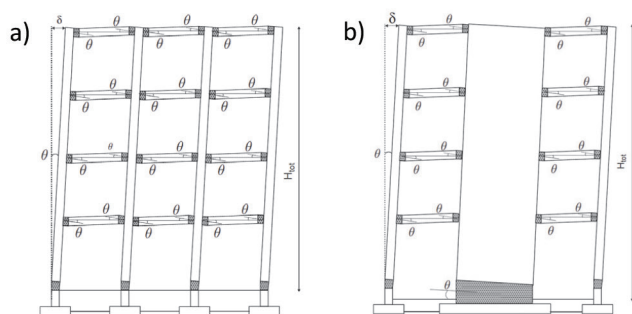
Koeficijent duktilnosti presjeka s obzirom na zakrivljenosti je definiran kao omjer zakrivljenosti presjeka u točkama 3 i 2 s dijagrama moment – zakrivljenost presjeka [2]. Točka 2 predstavlja zakrivljenost presjeka pri popuštanju vlačne armature, a točka 3 predstavlja zakrivljenost presjeka pri slomu presjeka, slika 2.



Slika 2. Karakteristični  $M - \varphi$  dijagram [2]



Iz izraza (1) i sa slike 1 se može zaključiti kako pri projektiranju novih armirano-betonskih konstrukcija, odabirom faktora ponašanja i pripadajućim koeficijentom duktilnosti, projektant kreira zahtijevanu kombinaciju otpornosti na unutarnje sile i duktilnosti konstrukcije koju građevina mora posjedovati kako bi zadovoljavala granično stanje nosivosti. Nadalje, osiguravanjem duktilnosti elemenata konstrukcije, omogućuje se preraspodjela sila nakon početka popuštanja armature pojedinih elemenata. Preraspodjelom sila se u potpunosti mogu aktivirati poželjni plastični mehanizmi građevine i maksimizirati potrošnja unesene energije tijekom trajanja potresa, slika 3.



Slika 3. Plastični mehanizam okvirnog sustava, b) plastični mehanizam zidnog sustava, [3]

## 2 Proračun duktilnosti presjeka

Poznavanjem duljine plastičnog zgloba i duktilnosti presjeka, odnosno zakrivljenosti presjeka pri slomu i popuštanju armature, mogu se definirati  $M - \theta$  dijagrami plastičnih zglobova za duktilne elemente. Opisivanje dijagrama plastičnih zglobova ima primjenu pri modeliranju realnog ponašanja građevina tijekom djelovanja potresa uvažavajući materijalne nelinearnosti. HRN EN 1998-3 [4] daje izraze maksimalne vrijednosti zaokretanja vlakna za granično stanje blizu rušenja, granično stanje znatnog oštećenja i granično stanje ograničenog oštećenja. Slične smjernice su dane u ASCE 41-17 [5] u obliku tabličnih vrijednosti parametara za definiranje dijagrama plastičnog zgloba za pojedine elemente.

Proračun duktilnosti presjeka moguć je analitičkim izrazima [2, 6, 7]. U [2] dan je izraz za proračun koeficijenta duktilnosti s obzirom na zakrivljenost za zidove pravokutnog poprečnog presjeka:

$$\mu_{\varphi} \cong \frac{0,80 \varepsilon_{cu}}{1,44 \varepsilon_y} \frac{1}{(v + \omega_v)} \quad (2)$$

Gdje je:

$\varepsilon_{cu}$  - deformacija pri slomu betona

$\varepsilon_y$  - deformacija pri popuštanju uzdužne armature

$\nu$  - bezdimenzijski koeficijent uzdužne sile

$\omega_v$  - mehanički koeficijent armiranja uzdužnom armaturom hrpta zida.

U [7] autori su dali izraze za moment otpornosti, rotaciju elementa i sekantnu krutost za točku 2 na  $M - \varphi$  dijagramu, odnosno za stanje popuštanja armiranobetonskih greda, pravokutnih stupova, zidova i za elemente T, H, U ili šupljih presjeka, na osnovu velikog broja ispitivanja elemenata bez preklopa uzdužne armature u zoni plastičnog zgloba i negativnog utjecaja poprečnih sila. Također, dani su izrazi za proračun momenta popuštanja i zakrivljenosti pri popuštanju za presjeke s T ili U tlačnom zonom.

Zakrivljenost pri popuštanju greda ili stupova:

$$\varphi_y = \frac{1,54f_{y1}}{E_s d} \quad \text{ili} \quad \varphi_y = \frac{1,75f_{y1}}{E_s h} \quad (3)$$

Zakrivljenost pri popuštanju pravokutnih zidova:

$$\varphi_y = \frac{1,34f_{y1}}{E_s d} \quad \text{ili} \quad \varphi_y = \frac{1,44f_{y1}}{E_s h} \quad (4)$$

Zakrivljenost pri popuštanju zidova "T", "U", "H" ili šupljeg poprečnog presjeka:

$$\varphi_y = \frac{1,47f_{y1}}{E_s d} \quad \text{ili} \quad \varphi_y = \frac{1,57f_{y1}}{E_s h} \quad (5)$$

Gdje je:

$f_{y1}$  - granica popuštanja uzdužne armature

$E_s$  - modul elastičnosti uzdužne armature

$d$  - statička visina presjeka

$h$  - visina presjeka.

Budući da su izrazi empirijski izvedeni, vrijednost medijana u odnosu na eksperimentalno dobivene rezultate iznosi 1,0 dok su koeficijenti varijacije u rasponu od 16,2 % do 19,2 %.

U [6] autori su dali analitičke izraze za određivanje zakrivljenosti presjeka i rotacije elementa pri slomu. Izrazi su kalibrirani na osnovu velike baze ispitanih uzoraka

pod monotonim i cikličkim opterećenjem. Postupak određivanja zakrivljenosti pri slomu je dugotrajan i nije jednoznačan, a odabir izraza koji će se primijeniti ovisi o zadovoljavanju pojedinih jednadžbi tokom proračuna. Izrazi za rotaciju elementa pri slomu su dani na osnovu proračuna zakrivljenosti presjeka pri slomu i duljine plastičnog zgloba s koeficijentom varijacije do 80 %. Zbog velikog odstupanja od eksperimentalno izmjerenih veličina dani su i empirijski izrazi kojima se točnije opisuje ponašanje elemenata pri slomu monotonim i cikličkim opterećenjem. Dani su i izrazi za korekciju rotacije elementa pri slomu za elemente koji nisu armirani poprečnom armaturom sa kukama savinutim pod kutom od  $135^\circ$ , za elemente armirane glatkim šipkama i za elemente s preklapom armature u području plastičnih zglobova.

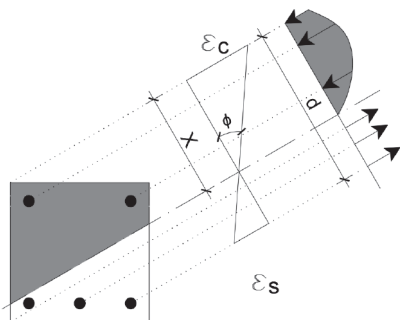
Zbog kompleksnosti proračuna presjeka s proizvoljnim rasporedom armature ili složenih poprečnih presjeka, često se koriste gotova programska rješenja koja se uglavnom zasnivaju na diskretizaciji poprečnih presjeka ili elemenata zidova u vlakna [8,9]. Primjer programa za analizu presjeka su ECTools NOUS, SEQAD, UCFyber, CONSEC, XSECTION, Response 2000, Idea Statica, ili pojedinačnih modula unutar programa za proračun konstrukcija poput SAP2000, ETABS, RFEM i dr. Proračun korištenjem većine programa je ograničen, ovisno o robusnosti programskog rješenja, na jednostavne presjeke, jednostavne dispozicije armature i uporabu samo po jednog radnog dijagrama za beton i armaturu. Pojedini programi poput SAP2000 imaju mogućnost odabira proizvoljne geometrije presjeka, dispozicije armature kao i pridruživanje više radnih dijagrama materijala betona ili armature

U radu [8] ispitano je 6 zidova "T" poprečnog presjeka, eksperimentalno dobiveni podaci pomaka vrha zida su uspoređeni s proračunatim pomacima zida na osnovu zakrivljenosti presjeka i duljine plastičnog zgloba. Nelinearna analiza presjeka napravljena je koristeći program Engineers' Studio, na principu podjele poprečnih presjeka u vlakna. Usporedbom rezultata pokazano je dobro poklapanje procijenjene maksimalne otpornosti elementa koji nisu razvili posmični slom i precjenjivanje krutosti elementa posebice u ranijim fazama ispitivanja zbog zanemarivanja utjecaja posmičnih deformacija i pojave zaostajanja posmika.

Za razliku od rada [8] u kojem su vlaknima modelirani poprečni presjeci zidova za proračun zakrivljenosti presjeka, u radu [9] savojno ponašanje je opisano na makro razini koristeći niz jednoosnih vlakana za modeliranje elementa zida i jednog vlakna u sredini zida za modeliranje posmičnog ponašanja elementa zida, temeljno na radu [10]. Takav pristup modeliranju naziva se "Multiple-vertical-line-element-model" ili MVLEM. Eksperimentalni rezultati su uspoređeni s rezultatima MVLEM analize i pokazano je da se uz kalibracije radnih dijagrama korištenih materijala mogu dovoljno točno proračunati savojna nosivost zida, bočna krutost za različite veličine deformacije, točka popuštanja armature, ciklička svojstva sila – pomak dijagrama, dijagram pomaka zida po visini, prosječne rotacije i pomaci unutar plastičnog čvora i položaj

neutralne osi. Slično kao u radu [8] naglašeno je da se modeliranjem elemenata zidova jednoosnim vlaknima ne može opisati utjecaj posmičnih deformacija i zaostajanja posmika u pojasnicama elementa.

Kontrolna analiza za usporedbu rezultata s opisanom metodom je napravljena programom SAP2000 v24.0.0. modulom Section Designer, općom metodom provjere koja se temelji na [1]. Osnovni princip rada je objašnjen na primjeru sa slike 4, prema [11].



**Slika 4. Stanje naprezanja i deformacija presjeka**

$M - \varphi$  krivulja formira se preko  $n$  broja proračunskih točki koje su međusobno povezane pravcima. Svaka proračunska točka definirana je iznosom momenta otpornosti presjeka za određenu zakrivljenost presjeka. Broj proračunskih točaka upisuje korisnik i svaka točka ima unaprijed definiran iznos zakrivljenosti. Na slici 4 je prikazan poprečni presjek, opterećen poznatim iznosom uzdužne sile i momentom savijanja. Zakrivljenost presjeka je definirana kao nagib pravca kojim je definirana deformacija presjeka, prema izrazu (6).

$$\varphi = (\varepsilon_c + \varepsilon_s) / d \quad (6)$$

Gdje je:

- $\varphi$  - zakrivljenost presjeka
- $\varepsilon_c$  - deformacija betona
- $\varepsilon_s$  - deformacija armature
- $d$  - statička visina.

Stanje deformacija po površini presjeka je definirano odabranim iznosom zakrivljenosti presjeka i položajem neutralne osi, tj. visinom tlačnog područja  $X$ . Naprezanja se računaju na temelju definiranih radnih dijagrama materijala i poznatih deformacija po točkama presjeka. Budući da je zakrivljenost presjeka unaprijed definirana po pojedinim točkama krivulje, za svaku točku se proračunava visina

tlačnog područja  $X$  za koju se postiže ravnoteža unutarnjih i vanjskih sila, što se radi iterativnim postupkom. Nakon postizanja ravnoteže uzdužnih sila presjeka, proračunava se moment od rezultanti unutarnjih sila (tlačne sile u armaturi i betonu i vlačna sila u armaturi) i vanjske sile. Proračunati moment za definiranu zakrivljenost čini jednu točku  $M - \varphi$  krivulje.

### 3 Opis predložene metode proračuna duktilnosti presjeka

Osnovna ideja proračuna je kao i kod većine programa, diskretiziranje presjeka u konačan broj dijelova. Čitav presjek se diskretizira u više manjih dijelova koji su paralelni s vektorom promatranog momenta otpornosti presjeka, primjer podjele presjeka je prikazan na slici 5a. Težištu svakog dijela se pridružuju pripadajuće površine armature i betona i pripadajući radni dijagrami materijala. Uvažavajući pretpostavku da poprečni presjeci ostaju ravni, za zadanu zakrivljenost jednostavno je izračunati deformacije težišta svakog dijela presjeka. Za proračun duktilnosti potrebne su zakrivljenost pri popuštanju vlačne armature – točka 2, i zakrivljenost pri slomu presjeka – točka 3 sa slike 2.

Zakrivljenost pri popuštanju, armature  $\varphi_v$  se određuje kao nagib pravca kojim je definirana deformacija presjeka sa slike 6a.

$$\varphi_v = \varepsilon_c / X_v \quad (7)$$

Gdje je:

- $\varepsilon_c$  - deformacija betona pri popuštanju armature
- $X_v$  - visina tlačnog područja pri popuštanju armature

Slom presjeka se može ostvariti na dva načina. Prvi način je dostizanjem maksimalne dozvoljene vlačne deformacije armature, za B500B iznosi 50 ‰, za B500C 75 ‰. Drugi način je dostizanjem maksimalno dozvoljene tlačne deformacije neovijenog betona, 3,5 ‰ za razrede betona  $\leq C50/60$  ili maksimalno dozvoljene tlačne deformacije ovijenog betona. Zakrivljenost pri slomu presjeka se određuje kao nagib pravca kojim je definirana deformacija presjeka sa slike 6b prema izrazu (8), odnosno sa slike 6c, prema izrazu (9).

$$\varphi_{u,s} = \varepsilon_c / X_{u,s} \quad (8)$$

Gdje je:

- $\varepsilon_c$  - deformacija betona pri slomu armature
- $X_{u,s}$  - visina tlačnog područja pri slomu armature

$$\varphi_{u,s} = \varepsilon_{c,u} / X_{u,c} \quad (9)$$

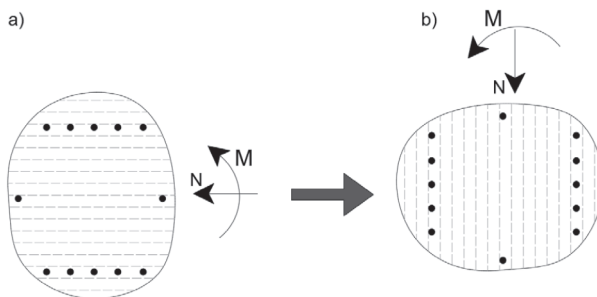
Gdje je:

$\varepsilon_{c,u}$  - deformacija betona pri slomu betona

$X_{u,c}$  - visina tlačnog područja pri slomu betona

Nakon podjele presjeka na određeni broj dijelova potrebno je upisati parametre svakog dijela presjeka. Radi lakše orijentacije tablicu za upis parametara dijela presjeka je pogodno orijentirati u istom smjeru kao i podjelu presjeka.

U ovom primjeru analiza presjeka je napravljena uz pomoć Microsoft Excela. Presjek je zarotiran kao na slici 5 stoga svaki stupac proračunske tablice sadrži podatke od jednom dijelu presjeka.

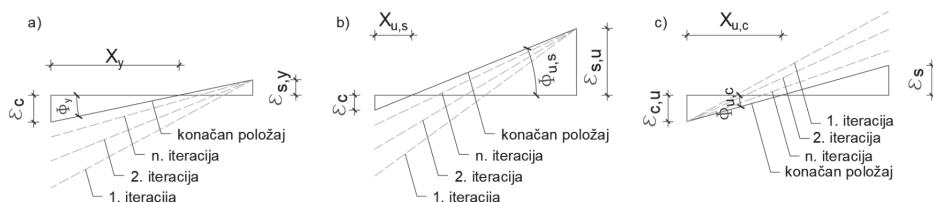


Slika 5. a) podjela presjeka, b) presjek zarotiran za analizu

Tablica 1. Shematski prikaz Excel tablice

Duljina dijela	Upisuje korisnik
Visina dijela	Upisuje korisnik
Udaljenost težišta dijela od tlačnog ruba	Programski se računa
Ukupna površina dijela presjeka	Programski se računa
Razred betona	Upisuje korisnik
Količina armature po pojedinom dijelu	Upisuje korisnik
Razred armature	Upisuje korisnik
Neto površina presjeka betona	Programski se računa

Nakon upisa podataka presjeka, potrebno je za točke 2 i 3 zadati poznate deformacije. Za točku 2 to je deformacija pri popuštanju armature. Za točku 3 to su već opisane deformacije betona ili armature ovisno je li je slom presjeka uvjetovan slomom betona ili armature. Mjerodavni slom je onaj koji se postiže za manju zakrivljenost presjeka.



**Slika 6. a) Iteracije pri popuštavanju vlačne armature, b) Iteracije pri slomu presjeka preko sloma vlačne armature, c) Iteracije pri slomu presjeka preko sloma betona**

Za određivanje zakrivljenosti presjeka, a uz poznatu deformaciju na jednom kraju presjeka, dovoljno je odrediti visinu tlačnog područja  $X$  za koju se postiže ravnoteža unutarnjih sila i vanjske sile. Iznos vanjske sile se upiše i direktno se unosi u sumu sila. Unutarnje sile se proračunaju iz deformacije težišta svakog dijela presjeka, površine betona i armature u svakom dijelu presjeka i upisanih radnih dijagrama materijala. Ovijanje betona kao i odabir različitih razreda betona unutar istog presjeka se može uzeti u obzir pridruživanjem različitih radnih dijagrama betona po dijelovima presjeka. Iterativni postupak određivanja vrijednosti  $X$  je iznimno jednostavno napraviti korištenjem naredbe "traženje rješenja", eng. "Goal Seek" uz postavljanje ćelije koja predstavlja sumu sila jednakoj nuli za traženu vrijednost  $X$ . Nakon određivanja vrijednosti  $X$  potrebno je izračunati mjerodavnu zakrivljenost presjeka i sumu momenata koju čine unutarnje i vanjska sila oko proizvoljne točke. Kao rezultat dobije se moment otpornosti presjeka za izračunatu zakrivljenost i poznati iznos vanjske sile.

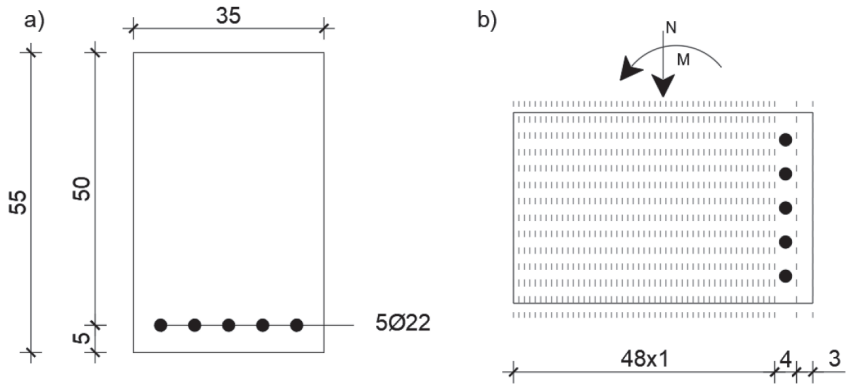
## 4 Analiza presjeka i usporedba rezultata

Analizirana su i uspoređena 3 presjeka:

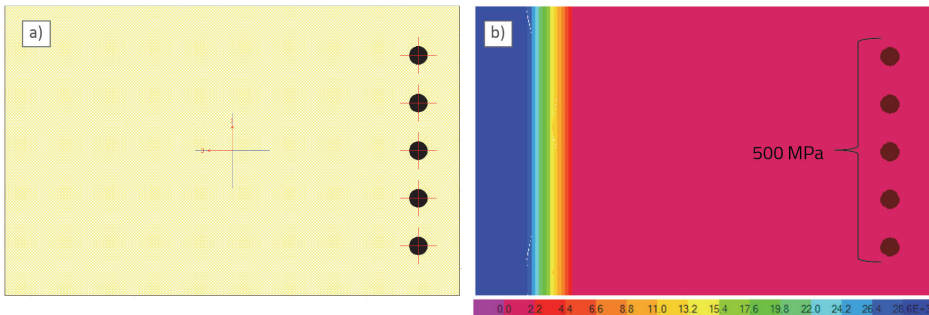
- Presjek 1 je pravokutni presjek, armiran u jednoj zoni i bez uzdužne sile
- Presjek 2 je jednak Presjeku 1 ali je opterećen uzdužnom tlačnom silom
- Presjek 3 je izabran kao složeni presjek poput jezgri dizala ili stubišta u visokogradnji

### 4.1 Presjek 1

Presjek je pravokutan, dimenzija  $b/h/d=35/55/50$  cm, analiziran je sa karakterističnim vrijednostima materijala, beton je razreda C30/37, armatura je razreda B500B, svi materijali su modelirani bilinearnim radnim dijagramima. Presjek je armiran u vlačnoj zoni s  $5 \text{ } \varnothing 22 = 19,01 \text{ cm}^2$ . Presjek je analiziran u SAP2000, Excel tablicom i rezultati su uspoređeni sa [12].



Slika 7. a) Presjek 1 i Presjek 2, b) Podjela Presjeka 1 i Presjeka 2 za potrebe proračuna Excel tablicom



Slika 8. a) Model presjeka u SAP2000, b) Stanje naprezanja pri slomu Presjeka 1 u SAP2000 [MPa]

Tablica 2. Rezultati analize programom SAP2000

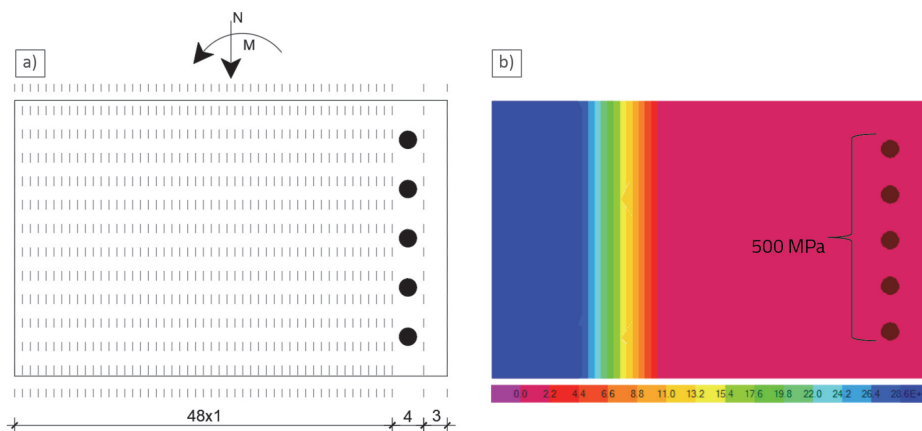
Presjek 1	Moment [kNm]			Zakrivljenost [1/m]		
	SAP2000	Skripta [12]	Excel tablica	SAP2000	Skripta [12]	Excel tablica
Točka 2	412,49	413,08	413,08	0,008227	0,008229	0,008227
Točka 3	430,09	430,2	430,55	0,028914	0,029	0,028997
Duktilnost				3,5145253	3,524122	3,52461408

Uspoređujući iznose proračunatih duktilnosti presjeka može se zaključiti kako su rezultati gotovo jednaki.



## 4.2 Presjek 2

Presjek je pravokutan, dimenzija  $b/h/d=35/55/50$  cm, analiziran je sa karakterističnim vrijednostima materijala, beton je razreda C30/37, armatura je razreda B500B, svi materijali su modelirani bilinearnim radnim dijagramima. Presjek je armiran u vlačnoj zoni s  $5\varnothing 22 = 19,01$  cm<sup>2</sup>. Razlika Presjeka 1 i Presjeka 2 je u dodatnoj uzdužnoj tlačnoj sili od 750 kN kojom je konstantno opterećen Presjek 2. Presjek je analiziran u SAP2000 i Excel tablicom.



Slika 9. a) Podjela Presjeka 2 za potrebe proračuna Excel tablicom, b) Stanje naprezanja pri slomu Presjeka 2 u SAP2000 [MPa]

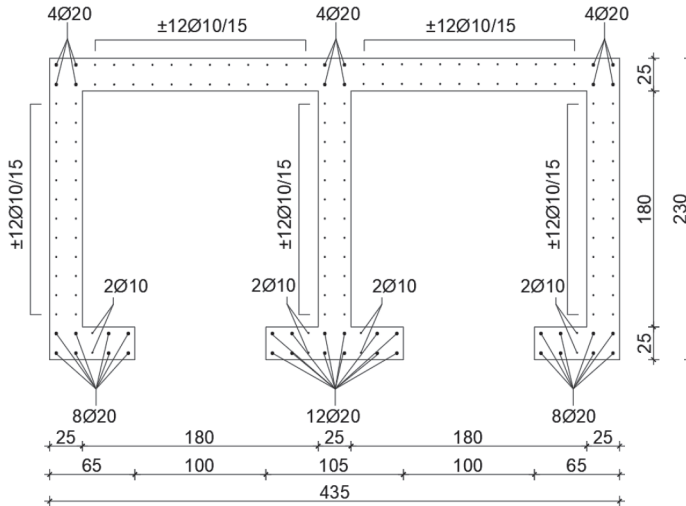
Tablica 3. Rezultati analize programom SAP2000

Presjek 2	Moment [kNm]		Zakrivljenost [1/m]	
	SAP2000	Excel tablica	SAP2000	Excel tablica
Točka 2	530,12	530,31	0,009981	0,009982
Točka 3	537,899	538,66	0,01618	0,0162
Duktilnost			1,621080052	1,622921258

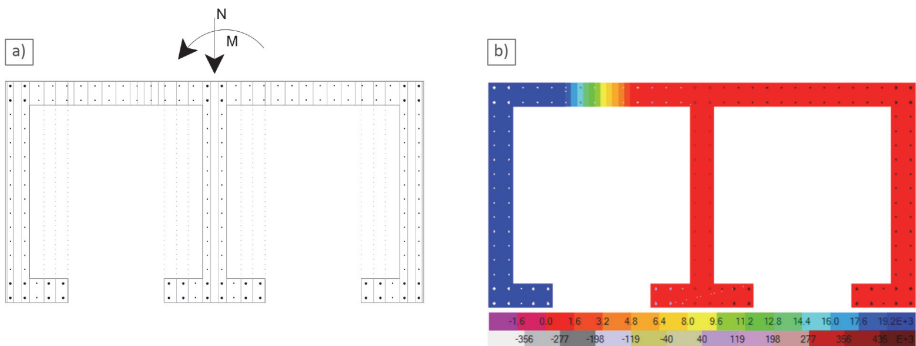
Uspoređujući iznose proračunatih duktilnosti presjeka može se zaključiti kako su rezultati gotovo jednaki.

### 4.3 Presjek 3

Presjek 3 je oblika karakteristične jezgre za dizala ili stubišta. Tlocrtni gabariti su  $b/h=230/435$  cm, debljine zidova su 25 cm. Površina presjeka je  $3,03 \text{ m}^2$  te je opterećen uzdužnom tlačnom silom 15 MN. Presjek je analiziran s proračunskim vrijednostima materijala, beton je razreda C30/37, armatura je razreda B500B, svi materijali su modelirani bilinearnim radnim dijagramima. Presjek je analiziran u SAP2000 i Excel tablicom.



Slika 10. Presjek 3



Slika 11. a) Podjela Presjeka 3 za potrebe proračuna Excel tablicom, b) Stanje naprezanja pri slomu Presjeka 3 u SAP2000 [MPa]

**Tablica 4. Rezultati analize programom SAP2000**

Presjek 3	Moment [kNm]		Zakrivljenost [1/m]	
	SAP2000	Excel tablica	SAP2000	Excel tablica
Točka 2	38947,38	38982,55306	0,0009156	0,00091572
Točka 3	44441	45974,34701	0,0023231	0,002515721
Duktilnost			2,537243338	2,747259586

Uspoređujući iznose proračunatih duktilnosti presjeka može se zaključiti kako su rezultati razlikuju za 7,6%, povećana točnost se može postići gušćom podjelom presjeka, posebice u zoni neutralne osi pri popuštaju i pri slomu presjeka.

## 5 Zaključak

U radu je opisan postupak analize armiranobetonskih presjeka i postupak računanja duktilnosti presjeka s obzirom na zakrivljenost. Napravljena je analiza triju presjeka te su dobiveni rezultati uspoređeni s rezultatima iz analize programom SAP2000, a za Presjek 1 i s primjerom iz [12]. Odstupanje rezultata predložene metode za Presjek 1 u odnosu na rezultate iz [12] je 0,01 % te 0,2 % u odnosu na rezultate dobivene programom SAP2000. Rezultati za Presjek 2 odstupaju 0,1 % u odnosu na rezultate analizom programom SAP2000, odnosno 7,6 % za Presjek 3.

Opisani postupak ima sljedeće prednosti:

- jednostavan je za programirati
- korisnik ima potpunu kontrolu procesa proračuna
- pruža precizne rezultate
- ne zahtijeva specijalizirane softvere izuzev npr. Microsoft Excela
- mogu se analizirati presjeci složene geometrije presjeka i dispozicije armature
- jednostavno se može uzeti u obzir ovijanje armiranobetonskog dijela presjeka ili uporaba armature različitih razreda duktilnosti

Nedostaci opisanog postupka analize presjeka su:

- potrebno je nešto više vremena za analizu presjeka složene geometrije, zbog unosa podataka
- opisani postupak vrši analizu samo za savijanje oko jedne jače osi presjeka uz prisutnost uzdužne sile. Za analizu dvoosnog savijanja s uzdužnom silom potrebno je presjek dijeliti na dijelove i u drugom smjeru što značajno komplicira unos podataka i analizu.
- točnost rezultata značajno ovisi u gustoći podjele presjeka

Daljnji razvoj bi bio povezivanje CAD programa i programa za analizu presjeka što bi ubrzalo unos geometrije i automatsku podjelu presjeka za analizu dvoosnog savijanja. Opisano bi značajno unaprijedilo robusnost i vrijeme potrebno za analizu presjeka.

## Literatura

- [1] Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade; EN 1998-1; CEN: Bruxelles, Belgija, pp. 37 - 73, 2011.
- [2] Penelis, G., Penelis, G.: Concrete Buildings in Seismic Regions, Second Edition, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 164 – 460, 2019
- [3] Fardis, M., N.: Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings, Volume 8, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, pp. 17, 2009.
- [4] Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada; EN 1998-3; CEN: Bruxelles, Belgija, 2011.
- [5] Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 2017 edition, Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers, 2017.
- [6] Biskinis, D., Fardis, M., N.: Flexure-controlled ultimate deformations of members with continuous or lap-spliced bars, Structural Concrete, 11 (2010), pp. 93–108.
- [7] Biskinis, D., Fardis, M., N.: Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars, Structural Concrete, 11 (2010), pp. 127–138,
- [8] Zhang, Z., Li, B.: Seismic Performance Assessment of Slender T-Shaped Reinforced Concrete Walls, Journal of Earthquake Engineering, 20 (2016), pp. 1342–1369.
- [9] Orakcal, K., Wallace, W., J.: Flexural modeling of reinforced concrete walls- Experimental verification, Structural Journal, 103 (2006), pp. 196 – 206
- [10] Alfoso V., Vitelmmo V., B., Vincenzo C.: Analytical modeling of R/C structural walls, Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering, Tokyo – Kyoto, pp. 41–46., 1988
- [11] Section Designer Manual, Computers and Structures, Inc., First Edition, Berkeley, California 94704 USA, pp. 115 – 120, 2000
- [12] Sorić Z., Kišićek T.: Betonske konstrukcije 3, Zagreb, pp. 30, 2013.

# Savijanje betonskih stupova armiranih FRP šipkama

mr. sc. **Igor Džajić**<sup>1</sup>, prof. dr. sc. **Domagoj Damjanović**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Inženjerski projektni zavod d.d., igor.dzajic@ipz.hr.

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

## Sažetak

Betonski stupovi namijenjeni elektrodistribuciji proizvedeni centrifugiranjem i prednapeti armaturom od vlaknima armiranog polimera imaju praktičnu potvrdu učinkovitosti i ekonomičnosti u situacijama ubrzanog dotrajavanja konvencionalnih stupova u primorskom okolišu. Nepostojanje normiranih računskih postupaka dimenzioniranja ovakvih elemenata, skromna baza eksperimentalnih istraživanja posebice kada je riječ o uporabi betona smanjenog ugljičnog otiska, uz nužan uvjet izrade nacionalne tehničke ocjene stavljanja na tržište, otežavaju veću komercijalnu uporabu. Ispitivanja svih tipova stupova jednog proizvođača različitih nosivosti i visina u postupku potvrđivanja sukladnosti gotovo je nemoguće i dugotrajan postupak i bio bi zamijenjen predloženim numeričkim metodama. Tema ovog rada daje doprinos teorijskom i eksperimentalnom istraživanju opisanog građevnog proizvoda.

*Ključne riječi: nemetalna armatura, ugljičnim vlaknima armirani polimer, CFRP, centrifugirani stupovi, prednapinjanje, ispitivanje do sloma, ispitivanje na savijanje, šuplji kružni presjek*

## Bending of concrete columns reinforced with FRP bars

### Abstract

Concrete poles for power distribution manufactured by centrifugation and prestressed with fibre-reinforced polymer reinforcement have proven to be efficient and economical in situations of accelerated deterioration of conventional poles in the coastal environment. The lack of standardized calculation procedures for the dimensioning of such elements, the modest base of experimental research, especially when it comes to the use of concrete with a reduced carbon footprint, along with the necessary condition of making a national technical assessment for placing it on the market, make greater commercial use difficult. Evaluating all column types of one manufacturer with different load capacities and heights in the process of attestation of conformity is near impossible and time-consuming procedure and would be replaced by the proposed numerical methods. The topic of paper contributes to the theoretical and experimental research of the described construction product.

*Key words: non-metallic reinforcement, Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP), centrifugally-cast poles, prestressing, ultimate load testing, bending testing, circular hollow cross-section*

## 1 Uvod

Beton klasično armiran čeličnom armaturom gradivo je koje se danas najviše koristi pri izgradnji građevinskih konstrukcija [1], po svom sastavu kombinacija je dvaju različitih materijala, koji zajednički sudjeluju u prijenosu opterećenja. Mnoge građevine od armiranog betona u agresivnim uvjetima okoliša podložne su koroziji armaturnog čelika i oštećenjima koja rezultiraju skupim popravcima i ograničenjima uporabe građevina. Problem trajnosti naglašen je u agresivnim sredinama, pa se kao jedno od rješenja nameće korištenje armature od vlaknima armiranog polimera -FRP (eng. Fibre Reinforced Polymer) [2]. Nakon desetljeća ispitivanja i ograničene primjene građevinskih elemenata i proizvoda možemo kazati da je novi materijal našao svoju tržišnu primjenu, ali za širu uporabu nedostaju normirani postupci proračuna uz uvažavanje različitosti postupka dizajniranja kada govorimo o savijanju, poprečnim silama, pukotinama i progibima. Betonski stupovi namijenjeni elektrodistribuciji proizvedeni postupkom centrifugiranja i prednapeti armaturom od vlaknima armiranog polimera svakako su jedan od proizvoda koji ima praktičnu potvrdu učinkovitosti i ekonomičnosti u određenim situacijama. Ovakvi proizvodi klasično armirani čeličnom armaturom ugrađuju se u elektrodistributivnu mrežu i izloženi su brzim dotrajavanjem posebice kada je riječ o primorskom okolišu. Prikazano istraživanje pokušaj je proučavanja učinkovitosti prednapinjanja centrifugiranih stupova FRP armaturom u odnosu na klasično armirane centrifugirane stupove. Ono predstavlja pokušaj razvoja i optimizacije postupka prednapinjanja centrifugiranih stupova FRP armaturom te prijedlog smjernica za dimenzioniranje betonskog šupljeg kružnog presjeka temeljem ispitanih mehaničkih značajki gradiva nelinearnom metodom proračuna korištenjem odnosa moment savijanja - zakrivljenost poprečnih presjeka uzduž promatranog elementa. Za sada ne postoje normirani računski postupci dimenzioniranja ovakvih elemenata, a baza ispitivanja je skromna posebice kada govorimo o uporabi betona smanjenog ugljičnog otiska, a jedan od važnijih i manje istraženih problema je sidrenje FRP armature. Tema ovog rada daje doprinos na polju teorijskog i eksperimentalnog istraživanja opisanog građevnog proizvoda.

## 2 Razvoj betonskih stupova armiranih nemetalnom armaturom

Kompozitne FRP šipke proizvode se procesom izvlačenja (pultrusion) od vlakana velike čvrstoće i krutosti impregniranih polimernom smolom koja nakon stvrdnuća daje željeni oblik. Osim otpornosti na koroziju, prednosti ovih materijala su velika čvrstoća, dobro ponašanje pod dinamičkim opterećenjem i niska zapreminska težina. Nedostaci su elastično ponašanje do sloma, mala ukupna deformacija, nehomogenost, pad čvrstoće na mjestu previjanja te popuštanje pod dugotrajnim opterećenjem bliskim čvrstoći [3]. Ovi materijali korišteni su u aeronautičkoj industriji

od vremena nakon II svjetskog rata, međutim armatura građevinskih konstrukcija od FRP-a nije smatrana isplativom jer nije bilo komercijalnih proizvoda na raspolaganju do 70-ih godina prošlog stoljeća [4]. Do 1990. godine razvija se komercijalna uporaba FRP armature u Japanu na više od 100 projekata. Uporaba FRP armature u Europi započinje u Njemačkoj, izgradnjom mosta prednapetog FRP armaturom 1986 godine [5]. Istodobno se događaju iskoraci u Kanadi i SAD-u, nakon što je započela industrijska proizvodnja FRP armature. Razvitak šipki, mreža, užadi i kabela od novog materijala pratila su intenzivna znanstvena istraživanja značajki gradiva, proizvoda i konstrukcijskih elemenata od betona armiranog FRP-om. Isprva se novi materijal primjenjivao u građevinama koje su zbog posebnih razloga trebale biti armirane nemetalnom armaturom, npr. u bolnicama s opremom osjetljivom na elektromagnetske pojave, da bi se njihova uporaba proširila na pomorske građevine, uzletno-sletne staze zračnih luka, mostove te općenito građevine kod kojih je naglašena važnost trajnosti. Obzirom na specifična svojstva armature od FRP-a, ona se većinom koristi za armiranje betona velike i ultra velike čvrstoće. FRP se proizvodi od staklenih, ugljičnih i aramidnih vlakana, povezanih epoksidnom smolom, poliestrom ili vinilesterom, uz kalupljenje i prešanje [1]. S inženjerskog motrišta vlakna se razlikuju po mehaničkim značajkama kao što su čvrstoća, krutost, gustoća i promjer vlakna. Glavni nedostatak jest da takvi proizvodi nisu duktilni, tj. nema izrazitog popuštanja materijala, kod određenog naprezanja, kao kod čelika [1]. Komercijalne šipke mogu se izvana obložiti kvarcnim pijeskom kako bi se osigurala bolja prionjivost s betonom pa je takva armatura korištena u ovom eksperimentalnom dijelu rada. Centrifugirani armiranobetonski stupovi šupljeg kružnog presjeka armirani FRP armaturom istražuju se od 1994, a prvi eksperimentalni primjerci ugrađeni su u prijenosnu mrežu jednog švicarskog distributera električne energije 1998. godine [6, 7]. Ovakvi stupovi primarno se koriste za prijenosne linije električne mreže, za distribuciju električne energije i kao nosači rasvjete. U mnogim slučajevima postavljaju se na lokacije koje se mogu karakterizirati agresivnom sredinom, bilo da se radi o tlu ili atmosferskoj izloženosti. Kružni presjek centrifugiranih stupova diktira njihov način proizvodnje, a prednost mu je u ravnoj i glatkoj površini te povoljnom estetskom učinku. Specifični zahtjevi naručitelja ovih konstrukcijskih elemenata čine primjenu nemetalne, nekorodirajuće armature vrlo interesantnom. Eksperimentalna proizvodnja stupova s FRP armaturom započinje u trenutku pooštrenja propisa za projektiranje betonskih konstrukcija, kao odgovor na zahtjeve za povećanjem zaštitnog sloja betona, čime su izmjere i masa konvencionalnih stupova postale nepraktične. Od tada su razvijeni različiti tipovi stupova od betona velike čvrstoće armirani šipkama od ugljičnim vlaknima armiranog polimera (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP). Čvrstoća, progib i otpornost na savijanje centrifugiranih betonskih stupova namijenjenih elektrodistribuciji, prednapetih armaturom od CFRP materijala eksperimentalno i numerički je analizirana u [8]. Ustanovljeno je da prikladno armirani, ovi elementi imaju zadovoljavaju-

ća svojstva na savijanje, uključujući svojstvo duktilnosti. Istraživanje je obuhvatilo utjecaj načina armiranja (uzdužnog i poprečnog) na raspucavanje, progibe i način otkazivanja nosivosti. U radu [9] istražena je otpornost na zamor stupova prednapetih CFRP armaturom, prvotno zbog pojave popuštanja prionjivosti između šipki i betona, te je ustanovljeno da ta pojava neće biti presudna za njihovo dotrajavanje. Rad [10] bavi se vezom – prijanjanjem između šipki za prednapinjanje od CFRP-a i betona, budući da ta značajka (proklizavanje šipki) bitno određuje ponašanje konstrukcijskih elemenata. U radu [11] istražen je sustav sidrenja šipki od CFRP kod prednapinjanja betonskih elemenata, budući da se te šipke uvriježeno prednapinju do 40% prekidne čvrstoće. Povećanjem sile prednapinjanja mogu se dobiti učinkovitiji presjeci, a ta se mogućnost prvenstveno omogućuje poboljšanjem kotvi u fazi prednapinjanja. Kod većine istraživanja korišteni su CFRP šipkama prednapeti tanki (30 mm na više) elementi od betona velike do vrlo velike čvrstoće (75 do 100 MPa). U odnosu na ostale raspoložive proizvode od polimera armiranih vlaknima, šipke od CFRP mogu biti nešto skuplje, ali su otpornije na zamor, iskazuju manje puzanje i manje gubitke uslijed relaksacije (popuštanje) nakon prednapinjanja, te su trajnije u alkalnoj sredini odnosno u betonu [12]. Opće karakteristike šipki, kabela i užadi značajno variraju, budući da ih je moguće prilagoditi različitim namjenama po čemu se ovi proizvodi značajno razlikuju od armaturnog čelika, čije se fizikalne i mehaničke značajke kreću unutar relativno uskih granica. Komercijalni CFRP proizvodi za armiranje betonskih konstrukcija obično imaju uzdužnu vlačnu čvrstoću od 600 do 3500 MPa, modul elastičnosti (uzduž vlakana) 100 do 580 GPa i izduljenje do sloma od 0,5% do 1,7% [13]. Velik broj obavljenih istraživanja obuhvatio je značajne aspekte ponašanja građevinskih elemenata prednapetih kabelima od vlaknima armiranog polimera, međutim ovo gradivo nije ušlo u propise za projektiranje, već se koriste smjernice, od kojih su najkorištenije one Američkog instituta za beton [14], premda su prve smjernice izdane u Japanu, a potom i u Kanadi. Europske smjernice izdao je fib [13] i njima su pokriveni principi proračuna za granična stanja nosivosti i granična stanja uporabljivosti za betonske elemente armirane nenapetom FRP armaturom. Principi proračuna za granična stanja sloma u smjernicama su slični, izvedeni iz postavki na kojim se temelje propisi za armirani i prednapeti beton [15]. Prikazana usporedba različitih propisa iskazuje velike razlike u preporukama koje se odnose na granična stanja uporabe. Tehničke značajke komercijalnih proizvoda redovito se kalibriraju opsežnim ispitivanjima, laboratorijskim i numeričkim iz čega se može iščitati potreba za daljnjim istraživanjima u ovom području. Za dimenzioniranje značajnog dijela betonskih konstrukcijskih elemenata mjerodavna je nosivost na savijanje ili savijanje s uzdužnom silom. Konvencionalni betonski elementi armirani ili prednapeti čelikom propisima uređenim postupkom projektiraju se na otkazivanje duktilnim slomom preko armature. Kod konstrukcijskih elemenata armiranih FRP armaturom slom preko armature može se opisati krtim, jednako kao i slom preko betona, pa dimenzioniranje često nameće slom preko betona kao za-



dano granično stanje. Što se tiče progiba, u sličnim uvjetima elementi armirani FRP proizvodima razvijaju veće progibe od usporedivih konvencionalnih elemenata, što se tumači manjim modulom elastičnosti FRP- armature, ali i popuštanjem veze beton – armatura [16]. Može se reći da je ponašanje CFRP šipkama prednapetih elemenata donekle istraženo, međutim, detalji ovakvih konstrukcija i dalje su predmet istraživanja budući da variranje značajki betona i armature pruža mogućnost za iskorak ka proizvodima poboljšanih svojstava.

### 3 Teorija proračuna

Značajnu barijeru širem korištenju betonskih stupova armiranih šipkama FRP-a predstavlja nedostatak formalno prihvaćene norme za projektiranje. Prvo su objavljeni propisi u Japanu [17], a zatim su slijedile europske preporuke na temelju projekta EUROCRETE project [18], te potom kanadski propis [19] dok su na kraju najviše korištene preporuke, koje su izdane u SAD od strane udruženja ACI [8]. Nekoliko europskih država izdalo je vlastite preporuke za korištenje FRP armature u betonskim konstrukcijama ili za njihovo ojačavanje [18]. Radna skupina udruženja fib (International Federation for Structural Concrete), nakon dugogodišnjeg rada više stručnjaka, objavila je publikaciju – fib Bulletin 40 koji obrađuje FRP armaturu u betonskim konstrukcijama [13]. Brojni rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazali su da se otpornost elementa opterećenog na savijanje može odrediti prema sličnom postupku kojim se dimenzioniraju elementi armirani čeličnom armaturom. Konkretno, može se reći kako je općenito prihvaćeno da se osnovna načela analize savojne otpornosti presjeka čelikom armiranih betonskih elemenata odnose i na one koji su armirani FRP-om uz određene preinake. Pri slomu elementa savijanjem, do otkazivanja dolazi ili drobljenjem betona u tlačnoj zoni ili kidanjem FRP armature u vlačnoj zoni [20]. Publikacija [13] usvaja okvir dan normama [21,22] za ocjenu momenta pri slomu presjeka armiranog FRP armaturom.

#### 3.1 Proračun stupova prilagođenim izrazima

Proračun sklopova napreznih savijanjem armiranih šipkama od FRP-a, donekle je već poznat međutim proračun vitkih elemenata, u što se ubrajaju ovi stupovi, napreznih ekscentričnom tlačnom silom tek je u fazi istraživanja. Problem niske krutosti šipki od FRP-a kao i linearno elastično ponašanje proizvoda od FRP gradiva do sloma te veliki omjer vlačne i tlačne čvrstoće zahtijevaju posebnu provjeru nosivosti stupova opterećenih na ekscentrični tlak. Prvo se mora odrediti granična vitkost ispod koje se stupovi dijele na kratke odnosno iznad spomenute granice stupovi su vitki. Za kratke se stupove može rabiti teorija savijanja koja je već u primjeni, dok se vitki elementi moraju proračunavati po teoriji II. reda ili nekim približnim postupcima gdje je vitkost iznimno važna. Kako su stupovi armirani šipkama od FRP-a više

osjetljivi na slom izvijanjem nego stupovi armirani čelikom, predloženo je smanjenje njihove granične vitkosti [15]. Kada se radi o vitkim elementima naprezanih na ekscentrični tlak primjenjuje se postupak povećanja momenta savijanja na deformiranom sustavu, predloženim američkim ACI-normama za proračun elemenata armiranih čelikom. Izraz za povećanje momenta savijanja glasi:

$$M'' = M \cdot \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Ed} / \varphi}{N_E}} \quad (1)$$

gdje je:

$M = N \cdot e_o$  – moment savijanja dobiven po teoriji I reda

$C_m = 0,6 + 0,4 \cdot (M_1 / M_2) \geq 0,4$  – koeficijent kojim se nejednolika raspodjela momenta savijanja po duljini elementa zamjenjuje jednolikom

$\phi = 0,75$  – faktor redukcije

$N_{Ed}$  – proračunska osna sila

$l_o$  – duljina izvijanja stupa

$$N_E = \frac{\pi^2 \cdot E_{cm} \cdot I''}{l_o^2} \quad \text{– Eulerova kritična sila}$$

$$E \cdot I'' = \frac{0,25 \cdot E_{cm} \cdot I_g}{1 + \beta_d} \quad (za \ e / h \leq 0,4) \quad (2)$$

$$E \cdot I'' = \frac{0,1 \cdot E_{cm} \cdot I_g}{1 + \beta_d} \quad (za \ e / h \leq 1,0) \quad (3)$$

$E \cdot I''$  – predstavlja fleksijsku krutost betonskog presjeka za naponsko stanje II (pojava pukotina)

$E_{cm}$  – sekantni modul elastičnosti betona

$I_g$  – moment tromosti punog betonskog presjeka

$\beta_d = M_d / M$  ili  $N_d / N$  – koeficijent kojim se uvodi puzanje betona ( $M_d$  – moment od dugotrajnog opterećenja)

**Tablica 1. Svojstva i granične vitkosti čelikom i FRP šipkama armiranih stupova**

Vrsta armature	Omjer tlačne i vlačne čvrstoće	Balansirani koeficijent armiranja $\rho_{pb}$ [%]	Granična vitkost
B500	1,0	5,70	22,2
AFRP	0,1	0,38	21,6
CFRP	0,3	0,90	18,7
GFRP	0,3	1,00	17,2

Tablica 1. prikazuje neka od svojstava i usporedbu čeličnih šipki za armiranje i triju vrsta FRP šipki. Pored omjera tlačne i vlačne čvrstoće prikazani su balansirani koeficijenti armiranja kao i izračunane granične vitkosti stupova armiranih navedenim vrstama FRP šipki. Balansirani koeficijent armiranja prilagođen novom gradivu:

$$\rho_{pb} = \frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1}{f_p} \cdot \frac{0,003 \cdot E_p}{0,003 \cdot E_p + f_p} + \frac{\rho_{p2} \cdot f'_p}{f_p} \quad (4)$$

gdje je:

$f_{ck}$  – karakteristična tlačna čvrstoća betona

$\beta_1$  – koeficijent kojim se definira visina pravokutnika tlačnih napreznja

$f_p$  – vlačna čvrstoća šipke od FRP

$f'_p$  – tlačna čvrstoća šipke od FRP

$E_p$  – modul elastičnosti FRP šipke

$\phi_{p2} = A_{p2} / (b \cdot d)$  – koeficijent armiranja tlačnog područja

$\phi_{pb} = A_{p1} / (b \cdot d)$  – balansirani koeficijent armiranja vlačnog područja

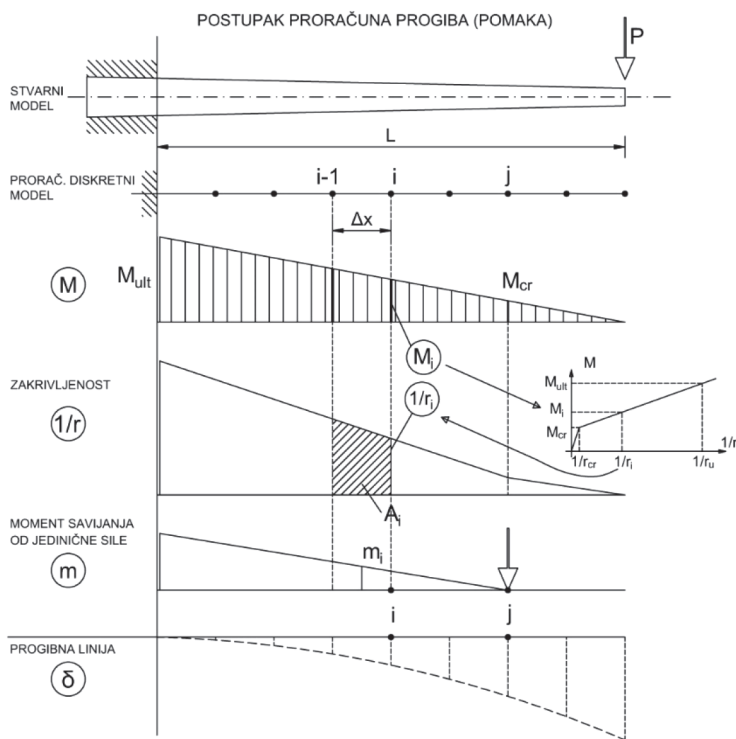
### 3.2 Kapacitet nosivosti i progib

Prethodno spomenute preporuke i postupci proračuna govore o armiranju presjeka FRP armaturom dok se prednapinjanje presjeka puno rjeđe obrađuje. Pri ispitivanjima do sloma prema normi [23] opterećenje na savijanje se provodi od nule do sloma konstantnim prirastom sile uz mjerenje progiba pa se dobiva P- $\delta$  dijagram. Na ovaj je način moguće točno odrediti nosivost na savijanje poprečnog presjeka i precizno izmjeriti progib stupa što onda služi za kalibraciju računskog modela. Predloženi nelinearni proračun korištenjem odnosa moment savijanja - zakrivljenost poprečnih presjeka uzduž promatranog elementa [24-26] temelji se na činjenici da se za raspucali beton zakrivljenost između dviju pukotina proračunava za stanje napreznja II odnosno da se javlja unutarnji spreg sila (tlačni beton i vlačna armatura) koji preuzima vanjsko opterećenje. Zakrivljenost presjeka između dviju pukotina manja je od one na mjestu pukotine.



Slika 1. Pojava pukotina za stanje napreznja II i neraspucani dio između njih

Potrebno je stoga za analitički model dobivanja dijagrama sila-progib podijeliti konzolu na jednake konačne elemente, izračunati momente savijanja u točkama diskretizacije i u sredini konačnog elementa te potom pripadnu zakrivljenost presjeka. Za svaki presjek stupa proračunavaju se naprezanja i relativne deformacije u armaturi, te u betonu na dva nasuprotna, najudaljenija ruba presjeka. Treba uzeti u obzir da su uzduž stupa kontinuirano promjenjivi šuplji presjeci, a time i konstantno promjenjiva krutost te da je metoda iterativna (povećavanje inkrementa sile) iz čega proizlazi da je ovo računski zahtjevan postupak koji bi se mogao ubrzati računalom. Za određivanje proračunske nosivosti presjeka nosivih elemenata prema metodama graničnih stanja koriste se proračunski dijagrami naprezanje-deformacija za beton i armaturu.



**Slika 2. Prikaz metode proračuna korištenjem bilinearnog dijagrama  $M-1/r$**

Izraz za progib u određenoj (diskretnoj) točki konzole:

$$\delta_j = \int_0^L \frac{1}{r} \cdot m \cdot dx = \sum_0^{int} A_i \cdot m_i \quad (5)$$

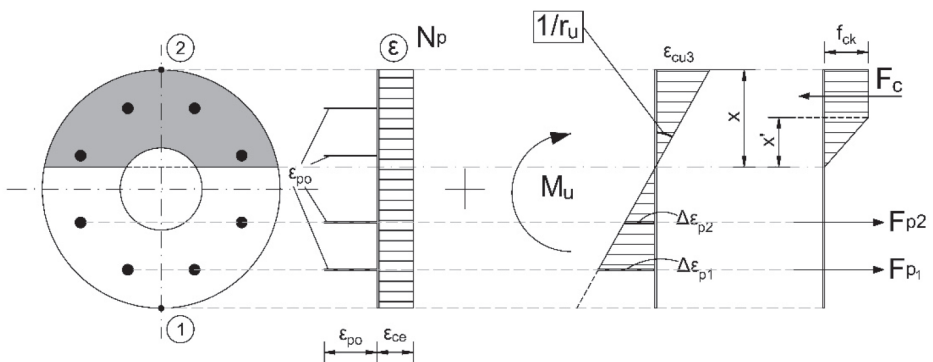
gdje je:

$A_i$  – ploština dijagrama zakrivljenosti ( $1/r$ ) u  $i$ -tom intervalu;

$m_i$  – ordinata dijagrama momenta savijanja od jedinične sile u  $i$ -tom intervalu kada se jedinična sila nalazi u  $j$ -toj točki. Vidi se da veći broj intervala daje veću preciznost. Ponavljanjem simulacije za jediničnu silu u svakoj točki konzole dobiva se progibna linija stupa.

Eksperimentima će biti određen konkretan radni dijagram betona dobivenog istraživanjima. Pretpostavka je da zbog zakrivljenog oblika presjeka treba koristiti bilinearni tlačni dijagram betona što norma [21] dozvoljava čime se postiže olakšanje (slika 3). Numeričko istraživanje temeljiti će se na realnim parametrima gradiva dobivenim laboratorijskim eksperimentima. Numerički modeli će biti kalibrirani rezultatima mjerenja sila, pomaka i naprezanja na eksperimentalnim modelima.

Vlačno ponašanje betona moguće je opisati jedino materijalnom nelinearnošću. Dakle za proračun potrebno je koristiti software koji može analizirati materijalnu nelinearnost kroz slobodan upis različitih parametara kako bi se dobila potrebna idealizirana krivulja koja opisuje materijal. Stoga će se u za numeričke simulacije provedenog eksperimenta koristiti računalni alati – software koji omogućuju proračun i obuhvaćaju materijalnu i geometrijsku nelinearnost. Modeliranje nelinearnog ponašanja će se opisati korištenjem 2D krivulje naprezanje-relativna deformacija za upis parametara čvrstoće za tlačno i vlačno naprezanje. Na slici 3. prikazano je granično stanje nosivosti prednapetog šupljeg betonskog presjeka gdje osna sila  $N_p$  uzrokuje centrično tlačno naprezanje, a vanjski djelujući moment savijanja  $M_u$  uzrokuje savijanje odnosno zakrivljenost određenog poprečnog presjeka  $1/r$ . Pri slomu dolazi do prekoračenja najvećeg tlačnog naprezanja betona  $f_{ck}$  u rubnom vlakancu kojemu odgovara najveća tlačna deformacija betona pri slomu  $\epsilon_{cu3}$ .



Slika 3. Prikaz graničnog stanja nosivosti pri drobljenju betona u tlaku

Gdje je sila u pojedinoj šipki  $F_{pi}$  i relativna deformacija  $\varepsilon_{pi}$ :

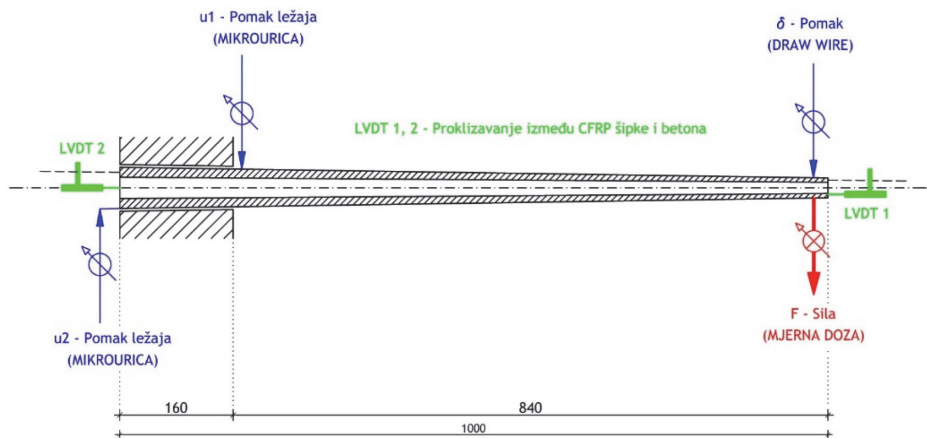
$$F_{pi} = A_{pi} \cdot E_p \cdot \varepsilon_{pi} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{pi} = \varepsilon_{po} + \Delta\varepsilon_{pi} \quad (7)$$

## 4 Eksperimentalni dio

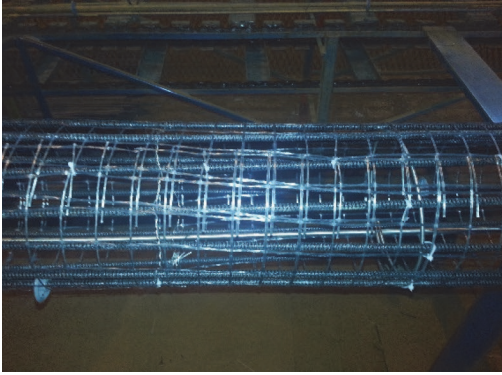
### 4.1 Uzorci i opis eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu ovoga istraživanja korišten je stup oznake SB 315/10 jer oko 20 % cjelokupne proizvodnje proizvođača otpada na ovaj tip stupa. Radi se o betonskom stupu čija je nazivna nosivost rezultante vodoravnih sila  $F_n = 3,15$  kN (315 daN) i ukupne duljine  $L = 10$  m. Mjerni postav prikazan je shematski na slici 4. Stupovi su ispitivani u horizontalnom položaju. Donji dijelovi uzoraka bili su fiksirani - upeti u betonske sidrene blokove, a na vrhu stupa – kojemu su omogućeni slobodni pomaci - aplicirana je horizontalna sila okomito na uzorak. Ispod vrha stupa su postavljena čelična kolica kako bi se izbjegao utjecaj vlastite težine na dobivene rezultate.



Slika 4. Shematski prikaz ispitivanja uzoraka

Ispitivanje stupova provedeno je na poligonu proizvođača, na uzorku od četiri stupa jednakih dimenzija, ali s različitim detaljima armature. Za kontrolu i usporedbu rezultata prvi uzorak armiran je konvencionalno - čeličnom armaturom. U tablici 2 prikazani su podaci o armaturi i betonu ispitivanih stupova. Drugi stup armiran je armaturom promjera #8mm od bazaltnih vlakana BFRP.



Slika 5. Armaturni koš od BFRP pripremljen za betoniranje

Treći stup bio je armiran sa šest šipki od ugljičnih vlakana CFRP dok je četvrti stup sa po osam CFRP šipki. Efektivni promjer CFRP šipki iznosio je 4,2 mm, a ukupni promjer šipke s matricom i oblogom od kvarcnog pijeska je 5,4 mm. Uzorak broj četiri je bio centrično prednapet prije stvrdnjavanja ukupnom silom  $P_0=110$  kN. U usporedbi s klasičnim prednapinjanjem čeličnim užadima, naprezanje je iznosilo je samo 40 % prekidne čvrstoće šipke, odnosno  $\sigma_{p,1}=1000$  MPa. Relativno malen postotak prednapinjanja ima uporište u nedovoljnom poznavanju ponašanja ove armature u području usidrenja, mogućnostima zahvata šipki i njihova prednapinjanja, bojazni od mogućnosti proklizavanja armature te nosivosti samoga kalupa koji mora biti sposoban samostalno se oduprijeti ukupnoj sili prednapinjanja i u procesu centrifugiranja rotira zajedno sa sustavom za usidrenje. U literaturi se preporučeno naprezanje u FRP šipkama pri prednapinjanju navodi u granicama od 800 do 1200 MPa [11].



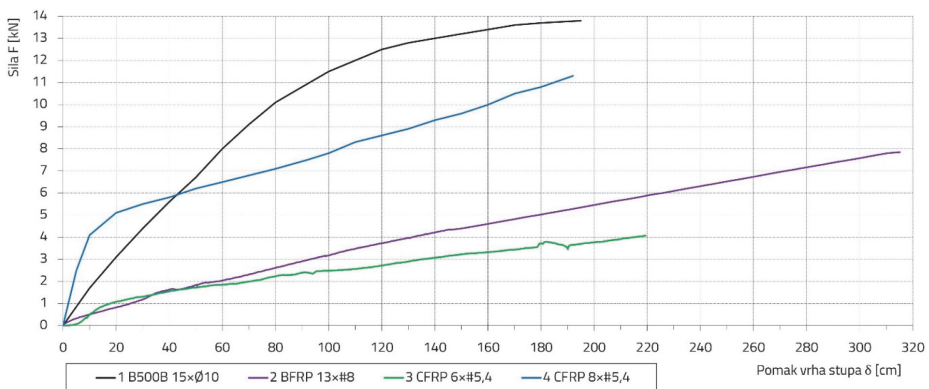
Slika 6. Armaturni koš od CFRP pripremljen za prednapinjanje

## 4.2 Rezultati ispitivanja do sloma

Referentni uzorak stupa koji je bio armiran čeličnom armaturom očekivano se slomio tako što je došlo do popuštanja armature nakon čega dolazi do drobljenja betona. Velika duktilnost kontrolnog uzorka je ostvarena svojstvom duktilnosti čelične armature. Dijagram opterećenje-pomak je linearan do pojave prve pukotine, nakon čega poprima parabolični izgled do sloma. Drugi uzorak koji je bio armiran BFRP armaturom zadovoljio je projektirane zahtjeve nosivosti. Dijagram P- $\delta$  pokazuje linearno ponašanje od početka ispitivanja do sloma. Međutim, zbog prevelikog progiba, relativnih deformacija i pukotina ovako armirani stup ne zadovoljava zahtjeve u pogledu uporabivosti. Treći uzorak armiran CFRP šipkama nije zadovoljio uvjete nosivosti iz očiglednog razloga nedovoljne količine armature. Dijagram P- $\delta$  pokazuje bilinearno ponašanje od početka ispitivanja do dostizanja  $M_{cr}$  i potom blažu liniju nagiba do sloma. S druge strane pokazao je da se budući uzorci trebaju prednapinjati kako bi se iskoristile superiorne značajke CFRP armature i smanjila potrebna količina FRP armature kada nije prednapeta. Četvrti uzorak armiran prednapetim šipkama od CFRP-a slomio su se drobljenjem betona tlačne zone, nakon čega je uslijedilo puknuće šipki od CFRP-a. Slom uzoraka armiranih CFRP šipkama nastupio je pri silama koje su 15 do 25 % manje od sile sloma referentnog uzorka armiranog čeličnom armaturom.

Tablica 2. Osnovni podaci o gradivima uzoraka i načinu armiranja

Armiranje uzorka	Prednapinjanje	Beton [MPa]	$f_{tk}$ [MPa]	E [GPa]	$k_{slom} \geq 1,8$
1-B500B- 15x $\Phi$ 10mm	Ne	C50/60	500	200	4,38
2-BFRP- 13x#8 mm	Ne	C50/60	1750	2,49	
3-CFRP – 6x#5,4 mm	Ne	C50/60	2600	180	1,29
4-CFRP – 8x#5,4 mm	Da	C50/60	2600	180	3,60



Slika 7. Dijagrami P- $\delta$  dobiveni ispitivanjem svih uzoraka stupova na savijanje do sloma



## 5 Zaključak

Unatoč činjenici da armatura od vlaknima armiranih polimera ima značajno različite mehaničke značajke u odnosu na uobičajenu armaturu od čelika, proračun i dimenzioniranje centrifugiranih armiranobetonskih stupova šupljeg kružnog presjeka može se temeljiti na istim postavkama ali uz uvažavanje principa projektiranja na savijanje, poprečnu silu, stanje pukotina, naprezanje i progib. Ono što je različito svakako u odnosu na konvencionalnu armaturu je drugačiji pristup stupnju sigurnosti. Stoga je potrebno unatoč golemim postignućima primjene FRP-a u armiranobetonskim konstrukcijama ispitati njegovo ponašanje u raznim vidovima primjene kako bi se moglo iskoristiti njegov puni potencijal.

Dobiveni zbirni P- $\delta$  dijagram prikazan na slici 7 jasno prikazuje prednost prednapinjanja centrifugiranih stupova i učinkovitost uporabe prednapete FRP armature u odnosu na klasično armirane centrifugirane stupove. Potrebno je dodatno razviti i optimizirati postupak prednapinjanja centrifugiranih stupova FRP armaturom i istražiti mogućnost povećanja početne sile prednapinjanja. Nadalje, poželjno je izraditi smjernice za dimenzioniranje betonskog šupljeg kružnog presjeka temeljem ispitanih mehaničkih značajki gradiva nelinearnom metodom proračuna korištenjem odnosa moment savijanja - zakrivljenost poprečnih presjeka uzduž promatranog elementa.

Nastavak istraživanja može se razvijati u dva smjera. Prvi smjer je u povećanju svojstva gradiva prvenstveno betona gdje bi se uporabom UHPC-a, smanjenjem debljine stijenki mogao postići superioran proizvod smanjene mase i troškova transporta uz istovremeno povećanje trajnosti. S druge strane suprotan smjer istraživanja može nastati uporabom betona normalne čvrstoće spravljenog od veziva smanjenog ugljičnog otiska uporabom cementa CEM II gdje bi se izostavljanje određene količine čistog portland cementa nadomjestilo dodavanjem letećeg pepela, mljevene zgre i mikrosilike. Nedostatak ovoga je smanjena hidratacijska toplina a time i razvoj ranih čvrstoća što je važno za industrijsku proizvodnju. S druge strane, ovakvi se proizvodi uglavnom zavaruju pa se i taj nedostatak brzine prirasta rane čvrstoće može nadvladati.

## Literatura

- [1] Kišiček, T., Sorić, Z., Rak, M.: Ispitivanje greda i ploča armiranih šipkama od PAV-a, GRAĐEVINAR, 59 (2007) 7, pp. 581-595
- [2] Kara, I. F.; Ashour, A. F.: Flexural performance of FRP reinforced concrete beams, Composite Structures 94 (2012) 1616-1625

- [3] Tomičić, I.; Sorić, Z., Kišiček, T., Galić, J.: Betonske konstrukcije mostova i zgrada armirane šipkama ili kabelima FRP-a; Zbornik radova Objekti na autocestama, HDGK, Plitvička jezera 2002, pp. 219-229
- [4] Guide for the Design and Construction of structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, ACI 440.1R-06, American Concrete Institute 2006.
- [5] Meier, U.; 1992, Carbon Fiber Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering, Structural Engineering International, Journal of International Association for Bridge and Structural Engineering, V. 2, No. 1, pp. 7-12
- [6] Terrasi G. P., Bättig G., Brönnimann R., 2001: High-strength spun concrete poles prestressed with CFRP, FRPRCS-5, Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures, ISBN 07277-3009-6, University of Cambridge, England 16–18 Jul 2001, Ed. C. Burgoyne, pp. 1103-1112
- [7] Terrasi, G. P., 1997: Mit Kohlenstoffasern vorgespannte Schleuderbetonrohre. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Diss. ETH Nr. 12'454, EMPA-Bericht 240
- [8] Shalaby, A. M., Fouad, F. H., Albanese R.; Strength and deflection behaviour of spun concrete poles with CFRP reinforcement, Precast/Prestressed Concrete Journal, Chicago, IL; Spring 2011, 55-77
- [9] Roberts, E.E.; Lees J.M.; Houtl, N.A.: Flexural Fatigue Performance of CFRP Prestressed Concrete, Advances in Structural Engineering v.15, (4):575:588 (2012)
- [10] Toumpanaki, E.; Lees, J.M.; Terrasi, G.P.: Bond Durability of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Tendons Embedded in High Strength Concrete, ASCE Journal of Composites for Construction (2018)
- [11] Terrasi, G. P.; Affolter, C.; Barbezat, M.: Numerical Optimization of a Compact and Reusable Pretensioning Anchorage System for CFRP Tendons; Journal of Composites for Construction; American Society of Civil Engineers; Vol. 15, No. 2, April 1, 2011., 126-135
- [12] Ceroni, F.; Cosenza, E.; Gaetano, M.; Pecce, M.: Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members, Cement Concrete Comp., 28(10), 857-868. (2006).
- [13] FRP Reinforcement in Concrete Structures, International Federation for Structural Concrete – Fib; Task Group 9.3, Lausanne, fib bulletin 40, pp. 1–147. (2007).
- [14] Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons, ACI Committee 440, ACI 440.4R-04, American Concrete Institute 2004.
- [15] Tomičić, I.: Proračun vitkih stupova armiranih FRP šipkama, GRAĐEVINAR, 57 (2005) 2, pp. 95-101

- [16] Pilakoutas, K.; Guadagnini, M.; Neocleous, K.; Matthys, S.; Design guidelines for FRP reinforced concrete structures, Structures and Buildings, Vol. 164, Issue SB4, ICE Publishing, Institution of Civil Engineers, 255-263
- [17] Japan Society of Civil Engineers, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials, JSCE, Tokyo, Concrete Engineering Series 23, 1997, pp 1-325.
- [18] Clarke, J.L., O'Regan, D.P., Thirugnananedran, C.: EUROCRETE Project, Modification of Design Rules to Incorporate Non-Ferrous Reinforcement, EUROCRETE Project, Sir William Halcrow & Partners London, 1996.
- [19] Canadian Standards Association, Canadian Highway Bridge Design Code, Section 16: Fibre Reinforced Structures, CSA, Canada, 1996, pp. 1-25
- [20] Song, S.; Zang, H.; Duan, N.; Jiang, J.: Experimental Research and Analysis on Fatigue Life of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Tendons, Materials 12 Licensee MDPI, Basel, Switzerland, 2019, p.p. 2-10
- [21] HRN EN 1992-1-1; Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade
- [22] HRN EN 1992-1-1 /NA; Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade -- Nacionalni dodatak
- [23] HRN EN 12843:2004: Predgotovljeni betonski proizvodi - Stupovi i motke (EN 12843:2004) Precast concrete products -- Masts and poles (EN 12843:2004)
- [24] Kišiček, T., Sorić, Z., Galić, J.: Određivanje progiba betonskih nosača s armaturom od polimera armiranih vlaknima, GRAĐEVINAR, 60 (2008) 6, pp. 499-511
- [25] Kišiček, T., Sorić, Z.: Dijagram moment savijanja-zakrivljenost za armiranobetonske grede, GRAĐEVINAR, 60 (2003) 4, pp. 207-215
- [26] Kišiček, T.: Progibi betonskih greda s FRP armaturom, Doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006



# Optimizacija oblika tensegrity sistema

Ivan Franić<sup>1</sup>, izv.prof.dr.sc. Petra Gidak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ivan.franic@sza.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, pgidak@grad.hr

## Sažetak

U radu je predložena metoda za pronalaženje sila i optimizaciju geometrije tensegrity sistema prema objektivu željenih sila u štapovima. Navedeni sistemi sadrže tlačne i vlačne elemente, pa time odstupaju od prednapetih vlačnih mreža kabela i jednoslojnih tlačnih rešetki koje su često predmet optimizacije metodom gustoća sila. Formulacija predstavlja metodu lokalne optimizacije primjenom nelinearnih najmanjih kvadrata, kojom je geometrija prvotno odabranog sistema, odabrana temeljem iskustva ili prije poznatog sličnog sistema, modificirana kako bi se smanjio rezidual između ostvarenih sila u štapovima te onih željenih od strane korisnika.

*Ključne riječi: pronalaženje oblika, optimizacija, štapni sustavi, tensegrity kupole, nelinearni najmanji kvadrati, metoda gustoće sila*

## Shape optimization of tensegrity systems

### Abstract

In the following article a method for force finding of tensegrity systems, and geometry optimization of those systems w.r.t. objective as prescribed target forces in elements is proposed. Such systems are composed of struts and cables, and therefore differ from pure tensile nets or compressive systems often optimized by force density method. The formulation represents a method of local optimization, based on nonlinear least squares, in which geometry of initial system, chosen based on experience or known examples, is modified with purpose of reducing the residual given by difference between achieved forces in members and those specified by user.

*Key words: form finding, optimization, truss systems, tensegrity domes, nonlinear least squares, force density method*

## 1 Uvod

### 1.1 Općenito

U radu se predlaže metoda za traženje oblika i optimizaciju tensegrity sistema. Metoda kao cilj uzima generalizaciju metode gustoća sila (eng. Force density method, FDM), koja se učestalo koristi u pronalaženju oblika vlačnih prednapetih mreža kabela ili jednoslojnih tlačnih rešetki, na mješovite sustave u kojima su prisutni tlačni i vlačni elementi. Poznato je da primjena metode gustoća sila podbacuje kada su prisutni tlačni i vlačni elementi u sustavu. Rezultati dobiveni FDM u navedenom slučaju predstavljaju degenerirane geometrije dimenzije manje od zadane dimenzije problema. Konkretno, problem zadan u 3 dimenzije daje 2-dimenzionalno rješenje.

### 1.2 Pregled postojećih metoda i prakse

Metode predložene za problem pronalaženja oblika mogu se podijeliti u 3 glavne kategorije: pronalaženje sila, pronalaženje oblika, te optimizacija topologije.

#### 1.2.1 Metode za traženje sila

U slučaju traženja sila topologija i geometrija sustava je poznata, te kroz proces rješenja ostaje konstantna, dok se pronalaze prihvatljive sile prednapona u pojedinim elementima, uz eventualno djelovanje vanjskih sila i zadane rubne uvijete. Također, moguće je zadavanje određenih ograničenja na varijable, kao što su npr. simetrija rješenja, predznak pronađene sile u pojedinim elementima i sl. Među nekima od metoda su DSVD metoda, predložena od [1] zasnovana na SVD dekompoziciji matrice ravnoteže sustava za dobivanje nezavisnih modova prednapona, te pronalaženju integralnog moda prednapona među dobivenim singularnim vektorima; te XFDM, proširena metoda gustoće sila, koja modificira metodu gustoća sila ograničenjima na pozicije točaka kako bi se primijenila na problem pronalaženja sila [2]

#### 1.2.2 Metode za traženje oblika

U slučaju traženja oblika formulira se problem u kojem sustav jednadžbi ima manjak jednadžbi u odnosu na broj nepoznanica, pa se kao ulazni podatci uvode željene sile ili duljine elemenata. U ovu kategoriju spada npr. metoda gustoća sila (FDM), i nelinearna metoda gustoća sila, (NLFDM) [3] koja je pronašla sveobuhvatnu primjenu u pronalaženju oblika prednapetih mreža kabela, te predstavlja jednu od najzastupljenijih metoda za pronalaženje oblika u praksi. Kao proširenje

FDM pojavljuje se Updated reference strategy, te Extended updated reference strategy (URS i x-URS) [4, 5] koja generalizira principe FDM na pronalaženje oblika prednapetih membranskih konstrukcija. Metode zasnovane na metodi gustoća sila, međutim, podbacuju kod sustava od vlačnih i tlačnih elemenata, kao što u svom radu [6] autor pokazuje. Kao rješenje navedenog problema predložen je niz metoda koje se u suštini temelje na iterativnoj modifikaciji matrice gustoća sile i/ili matrice ravnoteže sistema (opisane u poglavlju 2.2), s ciljem ostvarivanja singularnosti potrebne za pronalaženje prihvatljivog rješenja, kao što su Adaptivna metoda gustoće sila (Adaptive force density method), te Napredna metoda gustoće sila (Advanced force density method) [7, 8, 9, 10]. Ipak, potrebna su dodatna razmatranja i pretpostavke kako bi metode predložene u navedenoj literaturi prihvaćale ciljeve optimizacije u pogledu željenih sila u elementima, kao što je slučaj u klasičnoj FDM. Izvorno se FDM primijenila na prednapete mreže kabela, a u istom se obliku može primijeniti i na optimizaciju poprečnog presjeka jednoslojnih tlačnih rešetki, temeljem vlačno tlačne analogije (eng. Hanging cloth analogy).

### 1.2.3 Metode za optimizaciju topologije

Optimizacija topologije kao nepoznanice uzima i konektivnost elemenata, uz geometriju i sile u elementima. Obzirom na veliki opseg nepoznanica ovakve procedure često zahtijevaju definiranje velikog broja ograničenja na same varijable kako bi rezultati bili primjenjivi; ili ljudsku interpretaciju i doradu rezultata, ponajviše zbog složenosti i nepravilnosti dobivene geometrije rješenja, koja za sobom povlači kompleksnost izvedbe samih komponenti konstrukcije. Među najčešće metode spadaju algoritmi koji pretpostavljaju apsolutnu povezanost elemenata (postoje elementi između svakog čvora sustava), (eng. Ground structure) te potom sustavno eliminiraju elemente koji se kroz iteraciju pokazuju neiskorišteni prema zadanom kriteriju [11].

## 2 Optimizacija geometrije po kriteriju traženih sila u elementima

### 2.1 Općenito

Opisana je metoda kojom je moguće provesti optimizaciju tensegrity sustava sa rubnim uvjetima (tensegrity kupole) kako bi se ostvario željeni omjer sila između elemenata u sustavu. U prvom dijelu ovog poglavlja opisana je metoda kojom se pronalazi prihvatljivi vektor sila u elementima za zadanu geometriju sustava, dok je u drugom dijelu predložen optimizacijski algoritam koji temeljem pronađenog iznosa sila pronalazi promjenu u geometriji koja smanjuje rezidual zadan razlikom između ostvarenog vektora sila te željenog. Obzirom da male promjene u

geometriji mogu imati značajan utjecaj na iznose sila u elementima, problem je nelinearan, te se rješava iterativno prema teoriji 2. reda. Problem kao takav može posjedovati više lokalnih minimuma, a početna geometrija može utjecati na dobiveno rješenje, odnosno minimum prema kojem iteracija konvergira. Prema tome, potrebna je evaluacija dobivenih rezultata, pri čemu je, ukoliko vektor reziduala u konvergiranom rješenju nije zadovoljavajući, potrebno krenuti od drugačije inicijalne geometrije, ili izmijeniti samu topologiju sistema.

## 2.2 Matrični opis ravnoteže sustava

Neka je  $m$  broj elemenata sustava te neka je  $n$  broj točaka sustava. Matrica  $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$  predstavlja povezanost elemenata u sustavu te time jedinstveno definira topologiju sustava: ako je element  $k$  određen točkama  $i, j$  red matrice koji odgovara tom elementu definiran je kao:

$$C_k^i = 1, C_k^j = -1, C_k^h = 0, \quad i < j, \quad h \neq i \wedge j \quad (1)$$

Također, neka je  $q$  vektor gustoća sile definiran kao

$$q = L^{-1}p \quad (2)$$

Pri čemu vektor  $p$  predstavlja vektor sila u pojedinim elementima sustava, a matrica  $L$  jest dijagonalna matrica čije vrijednosti na dijagonali odgovaraju duljinama pojedinih elemenata sustava. Radi lakšeg zapisa, definira se generalni vektor slobodnih koordinata čvorova, generalni vektor koordinata fiksnih čvorova (ležajeva), te generalni vektor vanjskih sila opterećenja redom kao:

$$\beta = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix}, \beta_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix}, p_{ext} = \begin{bmatrix} p_{ext\ x} \\ p_{ext\ y} \\ p_{ext\ z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Gdje  $x, y, z$  predstavljaju koordinate svih čvorova sustava;  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  predstavljaju vektore koordinata slobodnih čvorova,  $x_f, y_f, z_f$  predstavljaju koordinate fiksnih čvorova, te  $p_{ext\ x}, p_{ext\ y}, p_{ext\ z}$  predstavljaju komponente vanjske sile u smjerovima osi Kartezijevog koordinatnog sustava. Fiksni čvorovi odgovaraju ležajevima konstrukcije, te se u njima pojavljuju sile reakcije, dok u ostalim, slobodnim čvorovima, ravnoteža mora biti zadovoljena samim djelovanjima elemenata te vanjskih sila na taj čvor.

Uz navedeni zapis, uvode se matrice  $D, D_f$  i  $A$  opisane kao:



$$D = C^TQC, D_f = C^TQC_f, A = \begin{bmatrix} \bar{C}^T \text{diag}(Cx) \\ \bar{C}^T \text{diag}(Cy) \\ \bar{C}^T \text{diag}(Cz) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Gdje je matrica povezanosti  $C$  rastavljena kao  $C = [C_f \bar{C}]$ , pri čemu  $\bar{C}$  predstavlja dio matrice koji odgovara slobodnim čvorovima, a  $C_f$  fiksnim čvorovima. Uz uvedene termine, globalni sustav jednadžbi ravnoteže moguće je izraziti kao:

$$D \otimes I^{\{3 \times 3\}} \beta = p_{ext} - D_f \otimes I^{\{3 \times 3\}} \beta_f \quad (5)$$

Ili

$$Aq = p_{ext} \quad (6)$$

Valja navesti da ova 2 matricna zapisa predstavljaju isti sustav izražen oko 2 različite varijable, konkretno koordinata slobodnih čvorova  $\beta$  i gustoće sila sustava  $q$ .

### 2.3 Pronalaženja sila u sustavu

Ako pretpostavimo vektor željenih sila u sustavu kao  $\bar{p}$ , iz sljedećeg izraza dobiva se vektor prototipa gustoća sile definiran kao:

$$\tilde{q} = L^{-1}\bar{p} \quad (7)$$

U pravilu, prototip vektora gustoća sila  $\tilde{q}$  ne zadovoljava uvijete ravnoteže sila u slobodnim čvorovima za inicijalno definiranu geometriju sustava, izraženu jednadžbom (6), stoga se u slobodnim čvorovima stvara vektor reziduala sile definiran kao:

$$A\tilde{q} - p_{ext} = -r \quad (8)$$

Obzirom da je geometrija zadana koordinatama  $x, y, z$  kroz trajanje ovog koraka fiksna, vrijedi pretpostavka o superpoziciji sila, pa je tako moguće tražiti promjenu vrijednosti vektora gustoća sila  $\Delta q$ , čiji će rezultirajući vektor sila poništiti vektor reziduala koji postoji u inicijalno zadanoj geometriji

$$A\Delta q = r \quad (9)$$

Matrica  $A$  u pravilu je "široka" pravokutna matrica koja predstavlja linearni operator u sustavu sa više varijabli nego jednadžbi (obzirom da su sustavi koji pri-

hvaćaju prednaponske sile statički neodređeni, ili u posebnom slučaju koji će biti spomenut kasnije, sustavi sa singularnom matricom A).

Prema tome, sustav (9) u pravilu prihvaća beskonačno mnogo rješenja. Dekompozicijom po singularnim vrijednostima matrice A dobiva se:

$$SVD(A) = USW^T \quad (10)$$

Matrica S na glavnoj dijagonali sadrži singularne vrijednosti  $\sigma$ , dok su ostali članovi =0. Matrice U i W rastavljene su kao  $U = [U_h \ U_s]$ ,  $W = [W_h \ W_s]$ , na način da  $U_h$ ,  $W_h$  predstavljaju prvih h stupaca matrica U i W, a  $U_s$  i  $W_s$  predstavljaju ostale stupce, pri čemu h predstavlja rank matrice A.

Uz navedeno, hiperploha kojom su definirana rješenja sustava (9) definirana je jednadžbom

$$\Delta q = \sum_{i=1}^h \frac{u_i^T r}{\sigma_{ii}} w_i + W_s \alpha \quad (11)$$

Gdje su  $u_i$ ,  $w_i$  vektori-stupci matrica U i W,  $\sigma_{ii}$  singularne vrijednosti sa glavne diagonale S, dok je  $\alpha$  vektor neodređenih koeficijenata.

Za detaljniju raspravu o primjeni SVD dekompozicije na predmetnu problematiku, i vezu sa rješenjima najmanjim kvadratima, čitatelj se upućuje na [12].

S obzirom na prisustvo beskonačno mnogo rješenja sustava, primjenjuje se metoda najmanjih kvadrata, koja traži  $\Delta q$  sa najmanjom vektorskom normom:

$$\Delta q = \arg \min \|\Delta q\|_2^2 \quad (12)$$

Kao rješenje jednadžbe dobiva se

$$\Delta q = A^T (AA^T)^{-1} r \quad (13)$$

$$q = \tilde{q} + \Delta q \quad (14)$$

$$p = L q \quad (15)$$

Geometrijski, dobiveno rješenje najmanjim kvadratima predstavlja ortogonalnu projekciju točke pretpostavljenog (u ovom slučaju odabranog prototipa vektora gustoća sila) rješenja na hiperravninu svih prihvatljivih rješenja sustava. Za detaljniju raspravu o primjeni metode najmanjih kvadrata čitatelj se upućuje na [13]

## 2.4 Optimizacija oblika obzirom na željene sile u elementima

Za sve elemente u sistemu određuju se, kao kriterij optimizacije, željene sile u elementima. Nadalje, ako do sada predstavljenu proceduru zapišemo kao funkciju koja kao ulazni podatak uzima vrijednosti koordinata slobodnih točaka  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ , a vraća vrijednosti sila u elementima (zbog jednostavnosti zapisa koordinate slobodnih točaka objedinjene su u jedan vektor  $\beta(3)$ ):

$$p(\beta) = Lq = L\tilde{q} + LA^T (AA^T)^{-1} r \quad (16)$$

Moguće je formirati i funkciju reziduala kao razlike sila iz  $i$ -tog koraka te zadanih vrijednosti sila

$$f(\beta) = p(\beta) - \bar{p} \quad (17)$$

Minimizacijom reziduala postavlja se problem optimizacije. Obzirom da je broj koordinata slobodnih čvorova u pravilu veći od broja elemenata, problem se formira kao problem nelinearnih najmanjih kvadrata.

Lokalnom linearizacijom funkcije  $f(\beta)$  oko točke  $\beta^{[i]}$  u koraku  $i$ , minimum reziduala se traži iterativno Gauss-Newtonovom metodom generalnog oblika:

$$\beta^{[i+1]} = \beta^{[i]} - G^{[i]+} f(\beta)^{[i]} \quad (18)$$

$$G^{[i]} = \frac{\partial}{\partial \beta} \left( f(\beta)^{[i]} \right) \quad (19)$$

Gdje  $G^{[i]+}$  označava pseudo-inverznu tangentnu matricu  $G^{[i]}$ . Za dobivanje tangentne matrice,  $G$  korištena je numerička derivacija (metoda konačnih razlika u 2 točke sa korakom  $u$  prema naprijed).

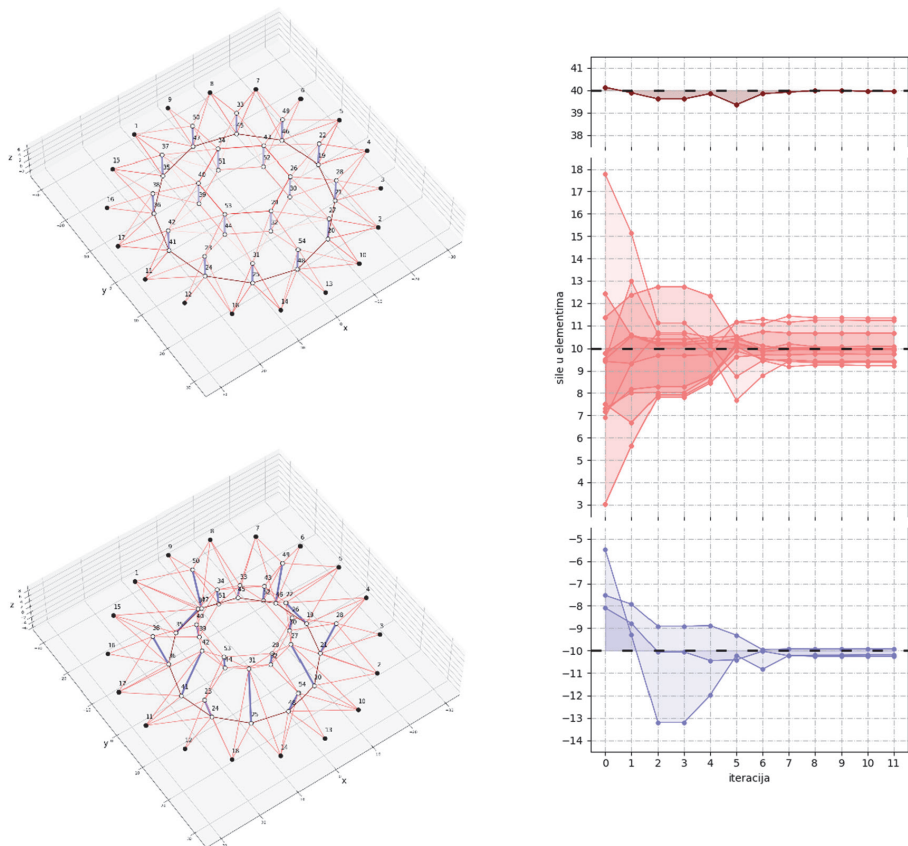
Obzirom na probleme konvergencije klasične Gauss Newton metode, koja je ovisna o odabiru početne geometrije i koliko je ona bliska geometriji u kojoj se ostvaruje minimum razlike ostvarenih i željenih sila, u praksi se često koriste poboljšani algoritmi uz pretraživanje po pravcu (eng. line search) ili regije povjerenja (trust region) koji kontroliraju veličinu koraka u svakoj iteraciji. Za navedeni problem korišten je Levenberg-Marquard algoritam, koji klasičnu Gauss-Newton metodu modificira dodatnim terminom  $\lambda$ , gdje je  $\lambda$  faktor prigušenja, a  $I$  identitetna matrica

$$\beta^{[i+1]} = \beta^{[i]} - \left( G^{[i]T} G^{[i]} + \lambda I \right)^{-1} G^{[i]T} f(\beta)^{[i]} \quad (20)$$

Pri čemu se faktor prigušenja odabire obzirom na uspješnost prošlog koraka u pogledu smanjenja ili povećanja reziduala. Na taj način klasična Gauss Newton metoda prigušena je dodatnim terminom, koji osigurava da se metoda približi rješenju, uz cijenu usporenja metode. U područjima loše konvergencije će prema tome nadvladati termin prigušenja, dok će u područjima sa visokom stopom konvergencije prednosti imati termini iz klasične Gauss Newton metode. Na taj način metoda nema problema sa konvergencijom, ali se produljuje trajanje optimizacije. U numeričkim primjerima za rješenje problema nelinearnih najmanjih kvadrata korištena je Scipy procedura `scipy.optimize.least_squares`, primjenom Levenberg-Marquardt algoritma. Kao kriteriji za zaustavljanje iteracije odabire se norma promjene reziduala u uzastopnim koracima kao  $\Delta f(\beta)$ ,  $\min = 0.005$

### Numerički primjer 1: Kiewit tensegrity kupola

U sljedećem primjeru provedena je optimizacija tensegrity kupole s okulusom, željene sile su specificirane kao 10 u užadima, -10 u štapovima, i 40 u glavnom donjem pojasu kupole.



Slika 1. Početna geometrija (lijevo gore), optimizirana geometrija (lijevo dolje), dijagram optimizacije (desno)

### 2.4.1 Slučaj sa singularnom matricom A

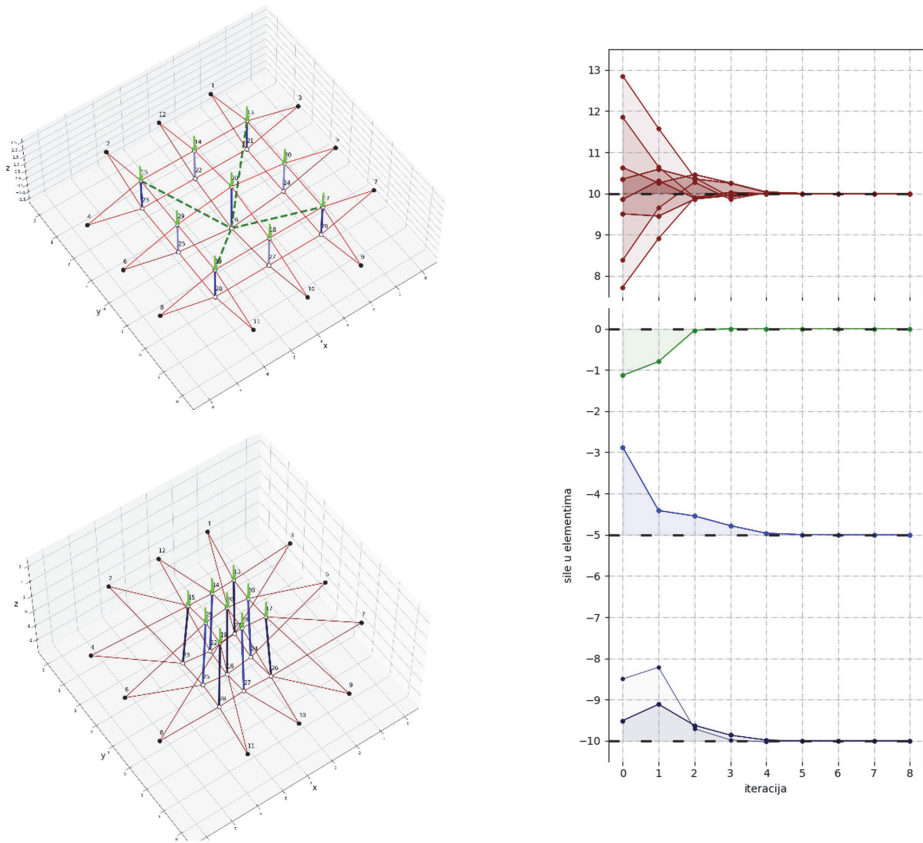
Do sada pokazani primjeri bazirani su na regularnim statički neodređenim sustavima, čija nezavisna rješenja prednapona proizlaze iz stupnja statičke neodređenosti. Međutim, mogući su i sustavi čija matrica A jest singularna, pri čemu svaka singularna vrijednost dobivena u SVD dekompoziciji matrice A dovodi do 1 nezavisnog rješenja prednapona i odgovarajućeg trenutnog mehanizma sustava [12] Obzirom da derivacija reziduala potrebna za optimizacijski proces sadrži derivaciju pseudoinverzne matrice, moguće je očekivati lošu kondicioniranost u postupku rješenja blizu točaka u kojima matrica mijenja rank. Prema tome, u ovakvim slučajevima predlaže se modifikacija početne geometrije sistema dodatnim virtualnim elementima, u kojima se potom u optimizacijskom procesu zahtjeva sila =0. Kako optimizacijski proces ne mora nužno ostvariti rješenje sa rezidualom 0, potrebno je osigurati da virtualni članovi u konačnom rješenju ne posjeduju sile. Usvojena je metoda množenja reziduala koeficijentom važnosti, pri čemu se formula u (20) augmentira težinskom matricom W, koja predstavlja dijagonalnu matricu sa koeficijentima važnosti pojedinih objekta optimizacije (članova vektora reziduala).

$$\beta^{[i+1]} = \beta^{[i]} - \left( G^{[i]T} W G^{[i]} + \lambda I \right)^{-1} G^{[i]T} W f(\beta)^{[i]} \quad (21)$$

Moguće je na ovaj način zadati važnost ostvarenja pojedinog od ciljeva optimizacije naspram preostalih ciljeva. U konkretnom slučaju, iščezavanje sila u virtualnim elementima obavezno mora biti ostvareno kako bi optimizacija bila uspješna, dok ostvarenje željenih sila u ostalim (realnim) štapovima ne mora biti stopostotno zadovoljeno, te u mnogo realnih slučajeva niti ne može biti. Prema tome, neka su članovi reziduala virtualnih štapova primarni ciljevi optimizacije, sa koeficijentom važnosti 10 000, dok su ostali ciljevi optimizacije množeni sa koeficijentom važnosti od 1. Valja napomenuti da kod ovakvog nametanja ostvarenosti objekta funkcije, koeficijent važnosti nužnih objekta treba biti dovoljno velik da nadjača ostale ciljeve u optimizaciji, ali opet ne prevelik kako ne bi doveo do loše kondicioniranosti tangentne matrice.

#### Numerički primjer 2: dvoslojna prednapeta mreža

U sljedećem primjeru provedena je optimizacija dvoslojne prednapete mreže razdijeljene štapovima. Željene sile u užadima su 10, a u štapovima -5, te -10, također sustav je opterećen vanjskim djelovanjem u iznosu od -1 po z osi u gornjim čvorovima konstrukcije. Kako je matrica A singularna, uvedena su 4 virtualna elementa koji osiguravaju dobru kondicioniranost tangentne matrice u optimizaciji.



**Slika 2. Početna geometrija (lijevo gore), optimizirana geometrija (lijevo dolje), dijagram optimizacije (desno)**

Numerički primjeri pokazuju iznose pojedinih reziduala po elementima kroz tijek optimizacije. U oba primjera zamiječeno je značajno smanjenje norme reziduala u odnosu na početnu konfiguraciju. Karakteristike proračuna neovisne su o mjerilu geometrije te o mjernoj jedinici sile, pa su jedinice u numeričkim primjerima prikazane kao bezdimenzionalne

### 3 Zaključak

Predstavljena je metoda za optimizaciju oblika tensegrity konstrukcija. Metoda je temeljena na uspostavljanju funkcije reziduala kao razlike traženih sila i onih ostvarenih u trenutnoj konfiguraciji sistema. Sile u koraku iteracije dobivene su, između beskonačno mnogo rješenja, metodom najmanjih kvadrata. Napominje se da funkcije reziduala mogu imati više lokalnih i globalnih minimuma, pa stoga

izložena metoda spada u metode lokalne optimizacije, a dobivena rješenja mogu ovisiti o polaznoj geometriji sustava. Za traženje globalnog minimuma, moguća je primjena raznih algoritama za globalnu optimizaciju, no sama tematika globalne optimizacije predstavlja vrlo široko područje za sebe te time ostaje van opsega ovog rada. Predložena metoda dopušta definiranje rubnih uvjeta kao fiksnih ležajeva, kao i vanjskih sila koje djeluju u čvorovima sistema.

Nadalje, iako je rad fokusiran na objektiv optimizacije u pogledu željenih sila u štapovima, napominje se da je primjenom principa izloženih u radu, moguće formulirati i druge objektivne optimizacije, kao i dodavati razna ograničenja na sam optimizacijski proces. Kao nastavak istraživanja, predlaže se detaljnije razmatranje analitičke formulacije tangentne matrice u procesu optimizacije, dodatna razmatranja u pogledu uvjeta konvergencije i ostvarivosti ciljeva optimizacije, zadavanje drugačijih ciljeva optimizacije, dodatne modifikacije samog optimizacijskog algoritma za predmetni problem, te razmatranje karakteristika konstrukcija dobivenih predloženom optimizacijom (izvedivost, stabilnost, krutost, itd.)

## Literatura

- [1] Yuan, X., Chen, L., Dong, S., Prestress design of cable domes with new forms, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 9, pp. 2773–2782, 2007.
- [2] Malerba, P. G., Patelli, M., Quagliaroli, M., An Extended Force Density Method for the form finding of cable systems with new forms, *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 42, no. 2, pp. 191–210, 2012.
- [3] Schek, H.-J., The force density method for form finding and computation of general networks, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 3, pp. 115–134, 1974.
- [4] Bletzinger, K.-U., Ramm, E., A General Finite Element Approach to the form Finding of Tensile Structures by the Updated Reference Strategy, *International Journal of Space Structures*, vol. 14, no. 2, pp. 131–145, 1999.
- [5] Bletzinger, K.-U., Dieringer, F., Wüchner, R., The eXtended Updated Reference Strategy for the form finding of tensile structures, *VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, STRUCTURAL MEMBRANES*, pp. 154–165, 2013.
- [6] Vassart, N., Motro, R., Multiparametered Formfinding Method: Application to Tensegrity Systems, *International Journal of Space Structures*, vol. 14, no. 2, 1999.
- [7] Zhang, J. Y., Ohsaki, M., Tensegrity Structures, Form Stability and Symmetry, vol. 6. Nagoya: Springer, 2014.

- [8] Gan, B. S., Computational Modeling of Tensegrity Structures: Art, Nature, Mechanical and Biological Systems. Koriyama: Springer International Publishing, 2019.
- [9] Tran, C. H., Lee, J., Advanced form-finding for cable-strut structures, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 47, no. 14–15, pp. 1785–1794, 2010.
- [10] Tran, H., Lee, J., Lee, K., Advanced form-finding for cable dome structures, in *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia, 2009.
- [11] Tejani, G., Savsani, V., Bureerat, S., Truss Topology Optimization: A Review, *Scholar's Press*, 2018.
- [12] Pellegrino, S., Structural computations with the Singular Value Decomposition of the equilibrium matrix, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 30., pp. 3025–3035, 1993.
- [13] Golub, G. H., van Loan, C. F., *Matrix Computations*, 4<sup>th</sup> ed. Baltimore: JHU Press, 2013.



# Seizmičko ponašanje inovativnih priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija

**Ozren Sudić<sup>1</sup>**, prof. dr. sc. **Davor Skejić<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Projektiranje Sudić d.o.o., ozren.sudic@projektiranje-sudic.com

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

## Sažetak

Proteklih par desetljeća, u području čeličnih konstrukcija velika se pažnja posvećuje razvoju inovativnih konstrukcijskih priključaka nosač-stup kojima se poboljšava ponašanje konstrukcija kod djelovanja potresa. Inovativnost priključaka s prigušivačima nije sadržana samo u kontroli mjesta razgradnje energije, nego i u mogućnosti njihove jednostavne zamjene. Rad daje koncept ponašanja inovativnih priključaka sa seizmičkim prigušivačima te rezimira stanje područja s naglaskom na razvoj tržišno prihvatljivog koncepta takvih priključaka.

*Ključne riječi: čelik, potres, priključak nosač-stup, inovativni tarni spoj, seizmičko prigušenje*

## Seismic behaviour of innovative joints of steel frame structures

### Abstract

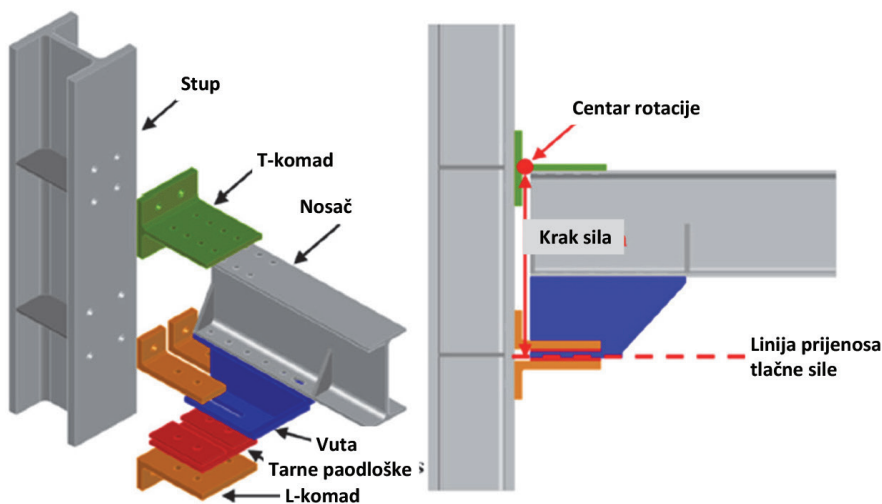
In recent decades, great attention has been paid in the field of steel structures to the development of innovative structural beam-to-column joints that improve the behaviour of structures under seismic action. The innovation of joints with dampers lies not only in the control of the location of energy dissipation, but also in the possibility to easily replace them. The paper provides a concept for the behaviour of innovative joints with seismic dampers and summarises the state of the art, focusing on the development of a marketable concept for such joints.

*Key words: steel, earthquake, beam-to-column joints, innovative friction connection, seismic dampers*

## 1 Uvod

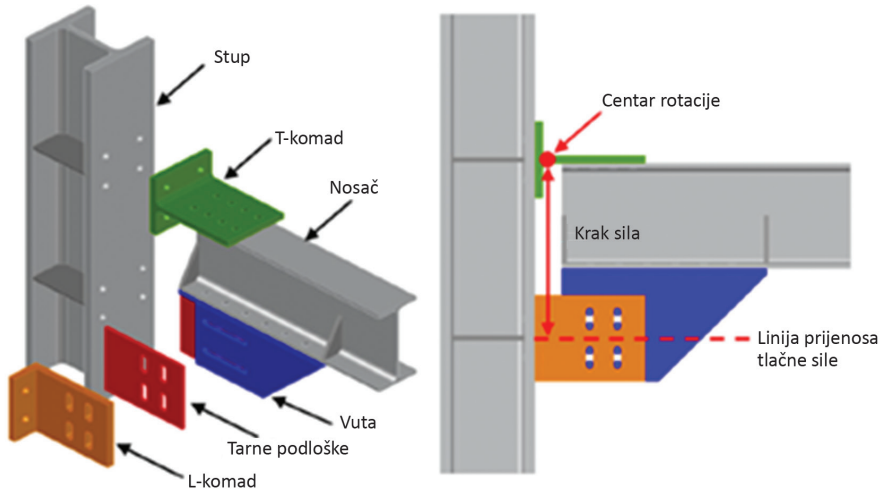
Tradicionalno su momentni priključci nosač-stup razmatrani kao potpuno kruti s punom otpornosti. U stvarnosti su to samo granični slučajevi ponašanja, te navedene pretpostavke mogu biti netočne i neekonomične, a naročito za slučaj djelovanja potresnih sila [1]. Sve navedeno bio je razlog razvoja inovativnih priključaka za čelične okvirne konstrukcije u seizmički aktivnim područjima koje zauzima sve veći prostor u znanstvenim istraživanjima posljednjih desetljeća [2]. Najčešće se radi o vijčanim priključcima nosač-stup, s osnovnom zadaćom za povećanjem potresne otpornosti konstrukcije. Vijčani momentni priključci (pune otpornosti) raznih tipova imaju prvenstvenu zadaću razgradnje seizmičke energije. Nakon provedbe razgradnje seizmičke energije, obzirom da se radi o vijčanim spojevima, iste je moguće zamijeniti novima. Mogućnošću zamjene priključaka (u cijelosti ili pojedinih njihovih komponenti) izbjegava se potreba za uklanjanjem konstrukcije nakon potresnog djelovanja, ako su iste dovele do trajnih oštećenja koja ne dozvoljavaju daljnju uporabu građevine. Obzirom na zahtjeve visoke preciznosti koji se postavljaju pred ovakve priključke, iste je potrebno proizvoditi u specijaliziranim proizvodnim pogonima adekvatne tehnološke razine. Također, postoje i zahtjevi za višim kvalitetama materijala koji se koriste za izvedbu ovakvih priključaka koji u principu funkcioniraju kao seizmički prigušivači.

Najčešće se kod razvoja priključaka nosač-stup radi o dva tipa priključaka. U prvom tipu vijci koji imaju funkciju disipacije energije postavljeni su u ravnini paralelno sa pojasnicom nosača, slika 1. [2], a u drugom tipu vijci su postavljeni u ravninama paralelno sa hrptom nosača, slika 2. [2].

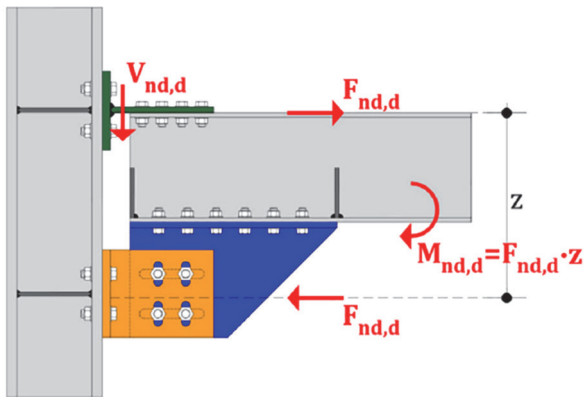


Slika 1. Tip priključka sa vijcima postavljenim paralelno sa pojasnicom nosača [2]

Kako bi se osigurala nosivost i duktilnost cijelog priključka potrebno je osigurati da svaka pojedina komponenta priključka zadovoljava tražene kriterije [2]. U principu, proces projektiranja priključka može se podijeliti u dvije osnovne faze. Prva faza je projektiranje "prigušivača", kao najslabije komponente, uz definiranje kapaciteta preuzimanja sile od strane istog. Prvenstveno se radi o dimenzioniranju vijaka u sklopu "prigušivača". U drugoj fazi se na temelju tako definirane veličine djelovanja projektira ostatak priključka, tj. komponente koje nemaju ulogu "prigušivača", slika 3. (prikaz principa prijenosa unutarnjih sila) [2]. Nakon usporedbi sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja, metode dimenzioniranja i pretpostavke predložene u sklopu istraživanja [2] pokazale su se ispravne.



Slika 2. Tip priključka sa vijcima postavljenim paralelno sa hrptom nosača [2]



Slika 3. Princip prijenosa unutarnjih sila za komponente koje nemaju ulogu "prigušivača" [2]

## 2 Stanje područja istraživanja

Glavnina istraživanja čeličnih priključaka nosač-stup fokusirana je na njihovo ponašanje pod statičkim opterećenjem [3-7]. Međutim, europske norme za projektiranje čeličnih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima [8-9] nalažu znatno zahtjevnije uvjete za ponašanje konstrukcija, odnosno samih priključaka.

Istraživanja i razvoj seizmički otpornih priključaka nosač-stup najčešće se provodi u području okvirnih konstrukcija. Istraživanja se fokusiraju najvećim dijelom na vijčane tipove spojeva, sa dodatnim elementima koji imaju zadaću "prigušivanja" trenjem ("friction damper"). Obzirom na projektne zahtjeve, te zahtjeve ugradnje spojeva u građevine, bilo nove ili one u rekonstrukciji, nužno je zadovoljiti kriterije precizne proizvodnje elemenata ovakvih priključaka. Samim time proizvodnja elemenata priključaka provodi se u visokospecijaliziranim pogonima. U nizu istraživanja [2, 10-16] provedenih tokom zadnjih godina, na numeričkoj i laboratorijskoj razini, došlo se do značajnih spoznaja o ponašanju ovakvih tipova priključaka, odnosno spojeva. Ponašanje priključaka prilikom djelovanja potresnih sila u najvećem dijelu je ovisno o vijcima i "prigušivačima", te je utjecaj istih na ponašanje priključka predmet cijelog niza laboratorijskih istraživanja.

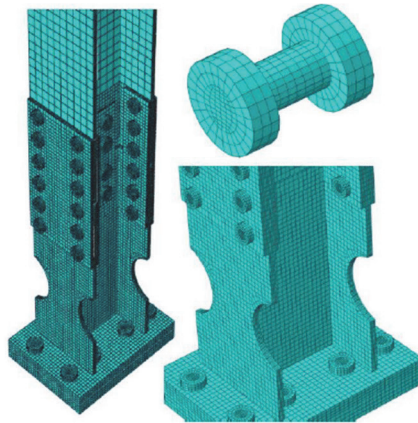
Kod vijčanih elemenata radi se o promatranju utjecaja veličine sile prednapreznja koja se unosi u vijak, na ponašanje priključka. Na primjer, cilj dijela istraživanja je definiranje jasne korelacije između sile prednapreznja vijka i koeficijenta trenja [12]. Također se promatra utjecaj broja i načina postavljanja vijaka, te podložnih pločica za vijke. Kod elemenata priključaka koji imaju funkciju "prigušivača" istraživanja se fokusiraju i na promatranje utjecaja izvedbe istih od različitih materijala na ponašanje priključaka [15]. Tako se pokazalo da mekši (neferitni) materijali mogu osigurati veću početnu vrijednost koeficijenta trenja u odnosu na tvrde materijale (karbidi). S druge strane tvrdi materijali mogu osigurati manje propadanje uslijed cikličkih opterećenja i male razlike u odgovoru na njih. Također, za razgradnju energije u ovisnosti od ukupno ostvarenih pomaka tokom potresa pokazalo se da su mekši materijali bolji za manje ukupne pomake, a tvrdi za veće vrijednosti ukupnih pomaka. Utvrđivanje granice tih dviju područja pomaka predmet je daljnjih istraživanja.

Trenutno je u procesu istraživanja i razvoja više tipova priključaka nosač-stup, a neki od sustava su i patentirani. Npr. sustav momentnog priključka s popustljivom vezom (engl. *Yield-Link Moment Connection*) [17], slika 4., je već i u komercijalnoj upotrebi u SAD.



Slika 4. Priključak nosač-stup s popustljivom vezom [17]

U daljnjem istraživanju i razvoju optimalnog inovativnog detalja priključka kriterij tržišne prihvatljivosti je također vrlo važan. Osim razvoja sustava priključaka nosač-stup kod novih konstrukcija, predmet interesa je i ugradnja inovativnih stopa stupa u konstrukcije koje su bile izložene djelovanju seizmičke sile, ali su mjesta razgradnje energije oštećena, slika 5., te ih je potrebno sanirati [18]. Priključcima bi se, ako je to moguće, izvela sanacija postojeće konstrukcije uklanjanjem deformiranog dijela elementa konstrukcije, te umetanjem novog. Veza novog i postojećeg elementa se izvodi vijčanim spojem, čime se izbjegava zavarivanje pri montaži. Time se izbjegava potreba za rušenjem cijele konstrukcije, a vijčani spoj dodatno poboljšava ponašanje priključka (zona pretvorbe energije) u eventualnim budućim potresima.



Slika 5. Prikaz oštećenog mjesta u djelomično zavarenoj izvedbi, te prijedlog načina sanacije [18]

U svrhu održive gradnje, ali i očuvanja kulturne baštine, rekonstrukcija postojećih zgrada postaje sve aktualnija tema. Različite međunarodne preporuke za rekonstrukciju ističu da upotreba tradicionalnih građevinskih metoda i materijala više nije prikladna, a često nije niti moguća. Kao alternativa tradicionalnim metodama preporučuju se metode rekonstrukcije čeličnim konstrukcijskim elementima koje, između ostalog, omogućavaju reverzibilnost postupka rekonstrukcije [19].

I normativni dio regulative također je svojevrsnom pretkvalifikacijom ovakvih priključaka i/ili njihovih komponenti [10, 11, 20, 21] dao na važnosti ovom području, ali je ograničen raspoloživim tipografijama i konfiguracijama priključaka [13].

### 3 Ciklička ispitivanja inovativnih priključaka nosač-stup

#### 3.1 Eksperimentalni programi

Vrednovanja teorijskih rezultata procjene svojstava inovativnih priključaka nosač-stup, provode se složenim cikličkim laboratorijskim ispitivanjima. Pri tome se ispitivanja provode za razne tipografije i konfiguracije priključaka, tj. priključci se razlikuju po tipu, položaju u konstrukciji (npr. jednostrani priključak nosača i vanjskog stupa, dvostrani priključak nosača i unutarnjeg stupa), tipu profila, tipu materijala "prigušivača" itd. [2, 12, 14, 15]. Pregled važnijih cikličkih ispitivanja inovativnih priključaka prikazan je u tablici 1.

**Tablica 1. Pregled važnijih cikličkih ispitivanja inovativnih priključaka nosač-stup**

Autori / Referenca	Opseg ispitivanja	Predmet ispitivanja
Francavilla, A. et. al. [2]	16 tipova uzoraka (124 ispitivanja): - 8 uzoraka priključka nosača i vanjskog stupa - 8 uzoraka priključka nosača i unutarnjeg stupa - 2 konfiguracije priključaka (priključak s vijcima postavljenim paralelno sa pojasnicom nosača i priključak sa vijcima postavljenim paralelno s hrptom nosača)	praćenje pomaka praćenje sile u vijku
Ferrante Cavallaro, G. et al. [12]	51 ispitivanje	- 3 različita tipa materijala "prigušivača" - varijacija pritezanja vijka (40 % - 100 %) - 3 načina slaganja pločica za vijke
Latour, M. et. al. [14]	4 ispitivanja	2 različita tipa "prigušivača" nosači različitih krutosti
Ferrante Cavallaro, G. et al. [15]	16 ispitivanja	8 različitih materijala "prigušivača"

## 3.2 Zaključci iz provedenih laboratorijskih ispitivanja

U većini ispitivanja pokazalo se da je cikličko ponašanje priključka u skladu s pretpostavkama proračuna [2, 12], a rezultati ispitivanja u kojima je promatrano više parametara, npr. utjecaj sile prednaprezanja, utjecaj konfiguracije podložnih pločica, utjecaj raznih koeficijenata trenja, daju kvalitetne smjernice za buduća istraživanja. U tablici 2. dan je pregled najvažnijih rezultata/spoznaja iz provedenih ispitivanja.

**Tablica 2. Zaključci iz provedenih ispitivanja**

Autori / Referenca	Rezultati ispitivanja
Francavilla, A. et. al.[2]	Ispitivanje je potvrdilo ispravnost predložene procedure dimenzioniranja spojeva. Razlika u ponašanju obje konfiguracije priključaka sa stajališta ukupnog ponašanja priključka je vrlo mala. Kod priključka sa vijcima postavljenim paralelno sa hrptom nosača stabilnije cikličko ponašanje. Svi spojevi sposobni se prilagoditi rotaciji do 50 mrad praktički bez oštećenja. Najveća prednost ovoga je mogućnost lagane prilagodbe rotacijske sposobnosti produženjem rupa na "prigušivaču".
Ferrante Cavallaro, G.et al.[12]	Za tvrde materijale optimalno pritezanje vijaka na iznos 60% maksimalne sile prednaprezanja. Razne konfiguracije podložnih pločica utječu na postojanost sile prednaprezanja u vijku. Razne konfiguracije podložnih pločica ne poboljšavaju cikličko ponašanje "prigušivača". Jače pritezanje vijaka, iako su oštećenja manja, ne poboljšavaju ukupno cikličko ponašanje "prigušivača".
Latour, M. et. al. [14]	Oba tipa "prigušivača" osiguravaju zadovoljavajuća svojstva priključka, sa stabilnim i predvidivim odgovorom. Konfiguracija s vertikalnim položajem "prigušivača" daje malo bolji odgovor. Numerički modeli odgovarajuće predviđaju rezultate ispitivanja. Varijacija kapaciteta savijanja obje konfiguracije je direktno proporcionalna sa silom prednaprezanja vijka.
Ferrante Cavallaro, G.et al.[15]	Mekši materijali mogu osigurati veću početnu vrijednost koeficijenta trenja u odnosu na tvrde materijale. Tvrđi materijali osiguravaju manje oštećenje prilikom cikličkih opterećenja i vrlo male razlike u odgovoru na pobudu. Mekši materijali se bolje ponašaju za sumarne pomake manje od 1700 mm tokom cikličkog opterećenja, a tvrđi za veće vrijednosti sumarnih pomaka. Iako mekši materijali mogu osigurati veću početnu vrijednost koeficijenta trenja, pokazuju veće varijacije u odgovoru.

## 4 Zaključak

U radu je dan osnovni pregled problematike projektiranja, te rezultata laboratorijskih istraživanja, uz pregled spoznaja dobivenih istraživanjima inovativnih priključaka za seizmički otporne čelične okvirne konstrukcije. Evidentno je da postoji još čitav niz područja u kojima je moguće istražiti ponašanja seizmički otpornih inovativnih priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija te samim time i poboljšati njihova tehnička rješenja. Laboratorijska ispitivanja trebala bi ići u smjeru odre-

divanja optimalne kombinacije komponenti priključka, uz poseban naglasak na materijale koji se koriste za izradu seizmičkih prigušivača.

Osim rješenja samih priključaka na nivou modeliranja i laboratorijskih ispitivanja, nužno je razmotriti i što jednostavniji način njihove zamjene nakon što su obavili svoju zadaću, odnosno nakon što su razgradili seizmičku energiju i sačuvali konstrukciju. Jedan od ciljeva je svakako i razvoj mogućnosti implementacije inovativnih priključaka ne samo u novim građevinama, već i onima koje se rekonstruiraju, bilo da je razlog sanacija šteta nakon potresa ili preventivno povećanje potresne otpornosti građevine. Konačni cilj daljnjeg istraživanja je razvoj optimalnog inovativnog, te tržišno prihvatljivog, detalja priključka.

## Literatura

- [1] Dujmović, D.; Androić, B.; Skejić, D.: Modeliranje priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija, *Građevinar*, 55 (2003), 339-348.
- [2] Francavilla, A., Latoru, M., Piluso, V. Rizzano, G.: Design criteria for beam-to-column connections equipped with friction devices, *Journal of Constructional Steel Research* 172 (2020) 106240.
- [3] Skejić, D.; Dujmović, D.; Androić, B.: Reliability of the bending resistance of welded beam-to-column joints, *Journal of Constructional Steel Research* Vol.64, No.4, (2008), pp. 388-399.
- [4] Skejić, D.; Dujmović, D.; Androić, B.: Behaviour of welded beam-to-column joints subjected to the static load, *Structural Engineering and Mechanics* Vol. 29, No. 1 (2008), pp. 17-35.
- [5] Skejić, D.; Dujmović, D.; Beg, D.: Behaviour of stiffened flange cleat joints, *Journal of Constructional Steel Research* Vol.103, No.12, (2014), pp. 61-76.
- [6] Javora, A.; Skejić, D.: Resistance assessment of beam-to-column joint with different blind bolt systems, *Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku* (1330-3651) 24 (2017), 4, 1103-1112.
- [7] Ptiček, M.; Skejić, D.; Veljković, M.; Rizzano, G.: Structural steel joints with bolts in threaded holes, *Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku* (1330-3651) 24 (2022), 4; 1382-1393.
- [8] CEN (2005): EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings; CEN, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2005.
- [9] CEN (2005): EN 1998-3: Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance—Part 3: Assessment and retrofitting of Buildings; CEN, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2005.



- [10] Moghaddam, H.; Afzalnia, F.; Hajirasouliha, I.; Optimal distribution of friction dampers to improve the seismic performance of steel moment resisting frames, *Structures* 37 (2022) 624-644
- [11] Paronesso, M.; Lignos, D.G.; Experimental study of sliding friction damper with composite materials for earthquake resistant structures, *Engineering Structures* 248 (2021) 113063
- [12] Ferrante Cavallaro, G., Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Cyclic response of low yielding connections using different friction materials, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 114 (2018) 404-423.
- [13] Ferrante Cavallaro, G., Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Standardised friction damper bolt assemblies time-related relaxation and installed tension variability, *J. Constr. Steel Res.* 41 (2018) 66-81.
- [14] Latour, M., D'Aniello, M., Zimbru, M., Rizzano, G., Piluso, V., Landolfo, R., Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 115 (2018) 66-81.
- [15] Ferrante Cavallaro, G., Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Experimental behaviour of innovative thermal spray coating materials for FREEDAM joints, *Composit. B Eng.* 115 (2017) 289-299.
- [16] Oliveira, S., Costa, R., Santos, A.F., Da Silva, L.S., Harada, Y., Piluso, V., A decoupled T-stub component model for the cyclic modelling of steel joint, *Journal of Constructional Steel Research* 209 (2023) 108044.
- [17] Ozkiliç, Y.O., A new replaceable fuse for moment resisting frames: Replaceable bolted reduced beam section connections, *Steel and Composite Structures*, Vol. 35, No. 3 (2020) 353-370
- [18] Yield-Link Moment Connection, [www.strongtie.com](http://www.strongtie.com) (Pristupljeno: 05.05.2024.)
- [19] Skejić, D., Lukačević, I., Ćurković, I., Čudina, I. (2020). Application of steel in refurbishment of earthquake-prone buildings, *GRAĐEVINAR*, 72 (10), 955-966
- [20] AISC, ANSI/AISC 341-16: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 2016.
- [21] AISC, ANSI/AISC 358-16: Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 2016.



# **IZVJEŠĆA O PROVEDENOM DODATNOM OBRAZOVANJU I USAVRŠAVANJU ZAPOSLENIKA**

rujan 2023. - srpanj 2024.

## "METIS" radionica o procjeni potresne opasnosti s obzirom na specifičnu lokaciju

**Maja Baniček**

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

### Sažetak

Radionica pod nazivom „METIS Workshop on site-specific seismic hazard assessment“ održana je 14.-15. studenog 2023. godine u Bergamu u Italiji. METIS je projekt financiran programom Europske komisije Horizon 2020 s ciljem razvoja i unapređenja alata i metoda korištenih u procjenama sigurnosti nuklearnih reaktora od potresa te njihovo uvođenje u praktičnu upotrebu. Potresna opasnost i rizik važan su dio toga istraživanja. Radionice koje se organiziraju u sklopu ovog projekta okupljaju mlade istraživače diljem Europe i svijeta gdje međusobno dijele znanja i iskustva uz podršku i vodstvo vodećih istraživača u području procjene potresnog rizika. Radionicu je organizirala Global Earthquake Model (GEM) zaklada s naglaskom na probablističku seizmičku analizu hazarda (PSHA) s obzirom na specifičnu lokaciju. Obrađene teme obuhvaćaju potvrdu PSHA modela, nove spoznaje i smjerove u modelima gibanja tla, utjecaj uvjeta tla na lokaciji, usporedbu PSHA modela sa stvarnim podacima i druge. Stečena znanja i vještine koje su polaznici stekli na ovoj radionici jesu upoznavanje s najnovijim postignućima iz područja proračuna lokalne potresne opasnosti te njihovo korištenje u programskom paketu OpenQuake.

*Gljučne riječi: potresna opasnost, potresni rizik, PSHA, Global Earthquake Model*

## "METIS" workshop on site-specific seismic hazard assessment

### Abstract

The "METIS Workshop on Site Specific seismic Hazard Assessment" took place in Bergamo, Italy from 14 to 15 November 2023. METIS is a project funded by the European Commission's Horizon 2020 programme to develop and improve methods and tools for assessing the safety of nuclear reactors in case of earthquakes and their implementation in practical use. Seismic hazard and risk are important part of this research. Summer schools and workshops organized as part of the project bring together young researchers from all over Europe and the world to share knowledge and experience with the support and guidance of leading researchers in the field of seismic risk assessment. The workshop was organized by the Global Earthquake Foundation (GEM) and focused on the analysis of probability of seismic catastrophes at specific locations. Topics covered include validation of PSHA models, new knowledge and directions of ground motion models, impact of site soil conditions, and comparison of PSHA models with real data. The knowledge and skills that the participants acquired at this workshop are introduction into latest achievements in the field of site-specific seismic hazard calculations and their use in the OpenQuake software package.

*Key words: seismic hazard, seismic risk, PSHA, Global Earthquake Model*

# Znanstveno usavršavanje na UPC Barcelona: Direktna metoda proračuna za aluminijske okvirne konstrukcije

**Andelo Valčić**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, andelo.valcic@grad.unizg.hr

## Sažetak

Direktna metoda proračuna (Direct Design Method) inovativan je pristup za proračun svih vrsta konstrukcija pomoću složenih numeričkih modela i simulacija. Ova metoda uzima u obzir neizvjesnosti u geometriji, materijalu, opterećenjima i drugim faktorima, omogućujući rezultate u jednom koraku bez iterativnog pristupa kao što je slučaj s trenutnim pristupom proračunu konstrukcija prema graničnim stanjima. Cilj dodatnog usavršavanja bio je proširiti primjenu ove metode na aluminijske okvirne konstrukcije. Tijekom boravka na Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) prikupljeni su podaci o varijacijama svih parametara koji utječu na otpornost aluminijskih okvira. Uz pomoć istraživačkog tima s UPC-a, provedene su numeričke analize i probabilističke analize koje su iznjedrile obećavajuće rezultate. Primjena ove metode unaprijedit će projektiranje aluminijskih konstrukcija, praksu i konkurentnost u ovom području.

*Ključne riječi: aluminij, direktna metoda proračuna, pouzdanost, znanstveno usavršavanje, okvirne konstrukcije, numeričke analize*

## Scientific training at UPC Barcelona: Direct Design Method for Aluminium Frame Structures

### Abstract

The Direct Design Method is an innovative approach for the design of all types of structures using complex numerical models and simulations. This method accounts for uncertainties in geometry, material, loads, and other factors, providing results in a single step without the need for an iterative approach, as is the case with the current approach according to limit states design. The goal of the scientific training was to extend the application of this method to aluminium frame structures. During a stay at the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), data on the variations of all parameters affecting the resistance of aluminium frames were collected. With the help of the research team at UPC, numerical and probabilistic analyses were conducted, yielding promising results. The application of this method will enhance the design of aluminium structures, as well as practices and competitiveness in this field.

*Key words: aluminium, Direct Design Method, reliability, scientific training, frame structures, numerical analyses*

## Sudjelovanje na radionici COMSOL Multiphysics

**Katarina Vranešić**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, katarina.vranesic@grad.unizg.hr

### Sažetak

Radionica COMSOL Multiphysics Intensive Training Course održana je u Kopenhagenu, Danska 5. i 6. prosinca 2023. godine. Cilj radionice bio je stjecanje osnovnih vještina za rad u računalnome programu COMSOL Multiphysics koji je između ostalog namijenjen i za modeliranje korozijskih procesa i lutajućih struja nastalih prometovanjem tračničkih vozila. Na radionici su obrađene sljedeće teme: kreiranja geometrije ispitivanog modela, definiranje numeričke mreže (eng. mesh), definiranje rubnih uvjeta te analiza rezultata. Sudjelovanje na ovoj radionici ostvarena su osnovna znanja za nastavak vlastitog znanstvenog istraživanja koje se do sada baziralo na laboratorijskim ispitivanjima, a u daljnjim je koracima predviđeno provođenje računalnih simulacija korozijskih procesa i lutajućih struja na različitim tipovima kolosiječnih konstrukcija u urbanim sredinama, kao i modificiranje karakteristika sustava pričvršćenja kako bi se ostvarile bolja svojstva kada je riječ o lutajućim strujama.

*Ključne riječi: COMSOL, korozija, lutajuće struje, sustavi pričvršćenja, kolosijeci u urbanim sredinama*

## Participation at the workshop COMSOL Multiphysics

### Abstract

The COMSOL Multiphysics Intensive Training Course Workshop took place on December 5 and 6, 2023 in Copenhagen, Denmark. The aim of this workshop was to acquire basic knowledge for working with the COMSOL Multiphysics software, which is intended, among other things, for modelling corrosion processes and stray currents caused by rail vehicle traffic in urban areas. The workshop covered the following topics: Creating the geometry of the test model, defining the numerical mesh, defining the boundary conditions and analysing the results. Participation in this workshop gave me the basic knowledge to continue my own scientific research, which so far has consisted of laboratory experiments. Further steps are to carry out computer simulations of corrosion processes and stray currents on different types of tracks in urban areas and to modify the properties of the fastening system to achieve better properties in terms of stray currents.

*Key words: COMSOL, corrosion, stray current, fastening systems, urban track*

# Usavršavanje LC3 – Limestone Calcined Clay Cement

**Katarina Didulica**

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

## Sažetak

Cilj usavršavanja LC3 – Limestone Calcined Clay Cement, je upoznavanje s najnovijim dostignućima u praćenju razvoja procesa hidratacije cementnih materijala. Radionica, uključuje prezentacije, rasprave i praktičnu nastavu najrelevantnijih i najperspektivnijih tehnika za ispitivanje cementnih materijala kao što su difrakcija, SEM-EDS, izotermalna kalorimetrija, ali i proizvodnju, ekološku održivost i isplativosti miješanih cementnih materijala. Kroz teorijsku nastavu dan je pregled teorije iza provođenja sofisticiranih laboratorijskih ispitivanja i obrada dobivenih rezultata, dok je praktični dio usavršavanja omogućio uvid u sve relevantne čimbenike koje je potrebno uzeti u obzir za izvođenje laboratorijskih eksperimenata što uključuje pripremu uzoraka, pokretanje uređaja i provođenje samog ispitivanja. Razmatraju se teorijska i praktična znanja iz sljedećih područja: hidratacija, procjena pucolanske reaktivnosti, XRD i mikroskopija, ponašanje u vremenu, sastav mješavine i upotreba dodataka te obrada rezultata.

*Ključne riječi: hidratacija, cementni materijali, laboratorijsko ispitivanje, difrakcija, mikroskopija, kalorimetrija*

## Training LC3 – Limestone Calcined Clay Cement

### Abstract

The aim of the PhD School LC3 – Limestone Calcined Clay Cement is to learn about the latest achievements in monitoring the evolution of the hydration process of cement materials. The workshop includes presentations, discussions and practical lessons on the most important and promising techniques for testing cement materials, such as X-ray diffraction, SEM-EDS, isothermal calorimetry, as well as the production, environmental impact and profitability of cement mixes. The theoretical lessons provided an overview of the theory of conducting sophisticated laboratory tests and processing the results obtained, while the practical part of the training provided an insight into all the relevant factors to be considered when conducting laboratory experiments, including the preparation of samples and the performance of the test itself. Theoretical and practical knowledge from the following areas is covered: Hydration, microstructure and porosity, pozzolanic reactivity assessment, XRD and microscopy, behaviour over time, composition of the mixture and use of additives, life cycle assessment and processing of results.

*Key words: hydration process, cementitious materials, laboratory testing, diffraction, microscopy, calorimetry*

## **Usavršavanje "Absolute environmental sustainability assessment of production and consumption in a systems perspective" na Tehničkom sveučilištu u Danskoj**

**Ivana Carević**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ivana.carevic@grad.unizg.hr

### **Sažetak**

Usavršavanje „Absolute environmental sustainability assessment of production and consumption in a systems perspective“ druga je po redu radionica pod organizacijom renomiranog Tehničkog sveučilišta u Danskoj Sekcije za kvantificiranje i ocjenu održivosti. Radionica daje pregled naj novih postignuća i saznanja te načina kvantificiranja održivosti sa osvrtom na praktičnu primjenu. Metodologija za apsolutnu procjenu ekološke održivosti (AESAs) je novo područje istraživanja koje ima za cilj uspoređivanje procijenjenog ekološkog opterećenja generiranog od strane sustava tijekom svog životnog ciklusa s nosivošću koja se može dodijeliti tom sustavu. Radionica daje detaljan pregled primjene alata ocjene životnog ciklusa kroz primjenu AESA metodologije te daje važne primjere primjena na razini država, tvrtke i ostale obrasce potrošnje. Dodatno kroz praktični dio usavršavanja omogućava se sudionicima da provode apsolutne procjene u praksi.

*Ključne riječi: AESA, održivost, životni ciklus, nosivost sistema, ocjena životnog ciklusa*

## **"Absolute environmental sustainability assessment of production and consumption in a systems perspective" training at Technical University of Denmark**

### **Abstract**

The workshop " Absolute environmental sustainability assessment of production and consumption in a systems perspective" is the second in a series organized by the renowned Technical University of Denmark's Section for Quantitative Sustainability Assessment. The workshop provides an overview of the latest achievements and insights, as well as methods for quantifying sustainability with a focus on practical application. The methodology for Absolute Environmental Sustainability Assessment (AESAs) is a new research area aimed at comparing the estimated ecological load generated by a system during its life cycle with the carrying capacity that can be allocated to that system. The workshop provides a detailed overview of the application of life cycle assessment tools through the application of AESA methodology and gives important examples of applications at the level of countries, companies, and other consumption patterns. Additionally, through the practical part of the training, participants are enabled to conduct absolute assessments in practice.

*Key words: AESA, sustainability, life cycle, carry capacity, life cycle assessment*



# Usavršavanje "Historic Masonry Structures" u organizaciji Universidad Politécnica de Madrid u Segoviji

**Tvrtko Renić**

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

## Sažetak

Cilj planiranog posjeta je prisustvovanje trening školi na engleskom jeziku koja je namijenjena poboljšanju znanja u području postojećih zidanih konstrukcija na statička i dinamička djelovanja. Na trening školi je naglasak postavljen na procjenu odgovora postojećih konstrukcija i metoda njihovog pojačanja, koje imaju drugačiju tipologiju i ponašanje od novih konstrukcija. Sudionici će se upoznati s metodama proračuna i specifičnim detaljima karakterističnim za takve konstrukcije. U sklopu trening škole planiran je niz predavanja, radionica i posjeta realnim konstrukcijama, a na kraju svaki sudionik izlaže projekt koji je radio tijekom radionice i testira se fizički model kupole svakog sudionika. Uz prikupljanje novog znanja, cilj je sklopiti nova poznanstva te proširiti mrežu znanstvenika sa istim interesom kako bi se omogućila potencijalna buduća suradnja na zajedničkim znanstvenim projektima i radovima.

*Gljučne riječi: postojeće građevine, zidane konstrukcije, pojačanje konstrukcija, procjena stanja*

## International summer school "Historic Masonry Structures" organized by Universidad Politécnica de Madrid in Segovia

### Abstract

The goal of the visit is to improve the understanding of the behaviour of existing masonry structures under static and dynamic loads. Highlight of the summer school is on the assessment of the response of existing masonry structures and methods of their strengthening, since their behaviour significantly differs from the behaviour of new structures. Participants will be introduced to the methods of design and specific details characteristic for that type of structures. Lectures, workshops and site visits are planned. At the end of the summer school students will present the project they worked on, and physical model of vault made by each participant is tested. In addition to obtaining new skills, the goal is to make new connections with scientists working in the same area.

*Key words: existing structures, masonry structures, strengthening, assessment*

## Usavršavanje "STAFFER Summer School on The European Railway System" u organizaciji Sapienza University of Rome, Faculty of Civil and Industrial Engineering u Rimu

**Franka Meštrović**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, franka.mestrovic@grad.unizg.hr

### Sažetak

Sudjelovanje na edukaciji „STAFFER Summer School on The European Railway System“ bilo je usmjereno na proširenje znanja o europskom željezničkom sustavu i njegovom regulatornom okviru. Obuhvaćene su teme interoperabilnosti, sustava signalizacije, održivih pogonskih sklopova, zelene mobilnosti, upravljanja sigurnošću i procjene rizika. Edukacija je omogućila dublje razumijevanje i usvajanje najnovijih tehnologija i praksi, čime se nastavlja unaprjeđenje kvalitete nastave i istraživanja u području željezničkog prometa. Kroz posjete operacijskim kontrolnim sobama, laboratorijima, postrojenjima za održavanje vozila i gradilištu potpuno automatiziranog metroa, stekao se praktični uvid u suvremene metode upravljanja, održavanja i zelene mobilnosti željezničkih sustava. Navedena iskustva pridonijela su sveobuhvatnijem uvidu u operativne aspekte modernih željezničkih sustava te primjeni stečenih znanja u nastavi i daljnjem istraživačkom radu.

*Ključne riječi: europski željeznički sustav, interoperabilnost, signalizacija, održivost*

## Training “STAFFER Summer School on The European Railway System” organized by Sapienza University of Rome, Faculty of Civil and Industrial Engineering in Rome

### Abstract

Participation in the “STAFFER Summer School on The European Railway System” was focused on expanding knowledge of the European railway system and its regulatory framework. Topics included interoperability, signaling systems, sustainable propulsion systems, green mobility, safety management, and risk assessment. The education enabled a deeper understanding and adoption of the latest technologies and practices, contributing to the improvement of teaching and research quality in the field of railway transportation. Through visits to operational control rooms, laboratories, vehicle maintenance facilities, and fully automated metro construction site, practical insights were gained into contemporary methods of managing, maintaining and green mobility within railway systems. These experiences contributed to a more comprehensive understanding of operational aspects of modern railway systems and the application of acquired knowledge in teaching and further research.

*Key words: European railway system, interoperability, signaling, sustainability, green mobility*

# **SAŽECI OBRANJENIH DOKTORSKIH RADOVA**

rujan 2023. - srpanj 2024.

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

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
<b>2023. godina</b>	
Određivanje koeficijenta prolaska topline elemenata vanjske ovojnice zgrade korištenjem infracrvene termografije dr. sc. Mergim Gaši	155
<b>2024. godina</b>	
Razvoj umjetnoga hidrauličnog vapna s otpadnim pepelom drvene biomase dr. sc. Jelena Šantek Bajto	156
Karakterizacija promjene signala georadara zbog korozije armature prouzročene kloridima u betonu dr. sc. Ksenija Tešić	157
Modeliranje ključnoga skupa kompetencija za povećanje uspjeha upravljanja građevinskim projektima dr. sc. Tomislav Rastovski	158
Unaprjeđenje potresnoga odgovora zida s jednostranim FRCM pojačanjem pomoću inovativnoga detalja prihvaćanja dr. sc. Ivan Hafner	159
Razvoj modela zasnovanoga na agentima za primjenu u hidraulici okolišnoga i obalnoga inženjerstva dr. sc. Tin Kulić	160
Doprinos utjecajnih parametara na podlokavanje oko stupova mostova zaštićenih riprapom dr. sc. Antonija Harasti	161
Određivanje mehaničkih svojstava nearmiranoga zida od pune opeke nerazornim i polurazornim metodama dr. sc. Luka Lulić	162
Ugovorni model održavanja prometnica temeljen na učincima dr. sc. Mladen Tomašković	163

## dr. sc. Mergim Gaši

### Životopis

Mergim Gaši rođen je 1993. godine u Makarskoj. Osnovnu školu pohađao je u Dražnicama i Podgori, a srednju strukovnu školu za elektrotehničara završio je u Makarskoj 2012. godine. Iste godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Godine 2015. upisuje diplomski sveučilišni studij na smjeru Teorija i modeliranje konstrukcija, koji završava 2017. godine s diplomom magistra inženjera građevinarstva i najvećom pohvalom. U listopadu iste godine zapošljava se na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao stručni suradnik na Zavodu za materijale. Od rujna 2020. do rujna 2023. godine radi kao asistent na istom zavodu. Aktivno sudjeluje u izradi stručnih projekata. U prosincu 2017. godine upisuje poslijediplomski sveučilišni doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje započinje istraživački rad u području građevinske fizike. Kao aktivni član i suradnik sudjelovao je na raznim domaćim i europskim projektima. Objavio je devet radova u časopisima, 16 radova u zbornicima skupova, sedam sažetaka na skupovima te sudjelovao na raznim međunarodnim i domaćim konferencijama kao autor i koautor.

Mentori: izv. prof. dr. sc. **Bojan Milovanović**

Datum obrane: 22. 9. 2023.

### Naslov dokorskog rada

## **Određivanje koeficijenta prolaska topline elemenata vanjske ovojnice zgrade korištenjem infracrvene termografije**

### Sažetak

Najveći dio potrošnje energije u zgradama otpada na transmisijske toplinske gubitke. Tradicionalni načini određivanja tih gubitaka svode se na određivanje koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) pojedinih elemenata zgrade u stacionarnim uvjetima koji se u stvarnosti nikada ne ostvare. Ta U-vrijednost ne uzima u obzir akumulaciju topline u elementima, degradaciju materijala uslijed efekta starenja, dinamiku prijenosa topline na površini uslijed strujanja zraka te energiju koja se zračenjem prenosi iz okoliša na promatranu površinu. Glavni cilj ovog rada je odrediti U-vrijednost pojedinih građevinskih elemenata zgrade korištenjem infracrvene termografije te izmjerenih parametara koji opisuju okoliš koji odvaja promatrani element. Tako određena U-vrijednost koristila bi se kako bi se realnije opisale energetske potrebe zgrade u cilju smanjenja potrošnje energije, za kontrolu izvedenog stanja novih zgrada te analizu stanja ovojnice postojećih zgrada prije energetske obnove..

## **dr. sc. Jelena Šantek Bajto**

### **Životopis**

Jelena Šantek Bajto rođena je 3. srpnja 1986. u Zagrebu, gdje je završila osnovnu i srednju školu, nakon čega upisuje studij građevinarstva na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. U listopadu 2012. godine diplomirala je s temom diplomskog rada "Energetsko certificiranje javnih zgrada" i time stekla akademski naziv magistra inženjera građevinarstva na smjeru "Materijali".

Nakon diplome radila je kao projektant mjera energetske učinkovitosti i zaštite od buke od 2013. do 2017., gdje je vodila specijalizirane građevinske projekte energetske obnove, provodila energetske preglede i aktivno sudjelovala u projektima vezanim uz uštedu energije, toplinsku zaštitu i zaštitu od buke te niskoenergetsku gradnju, fokusirajući se na odabir materijala kao i tehnologije za obnovu objekata kulturne baštine. Potom prelazi u Središnju agenciju za financiranje i ugovaranje (SAFU) gdje nadzire provedbu ugovora o gradnji financiranih iz programa SAFU-a unutar Službe za infrastrukturne i građevinske radove. Od 2018. radi kao asistentica u Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu. U tom svojstvu aktivno sudjeluje u znanstveno-istraživačkim projektima, fokusirajući se na integraciju nedovoljno iskorištenih otpadnih materijala u građevinskoj industriji.

Mentori:            prof. dr. sc. **Nina Štirmer**

Datum obrane: 15. 1. 2024.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Razvoj umjetnoga hidrauličnog vapna s otpadnim pepelom drvene biomase**

### **Sažetak**

Stavljajući sanacije i popravke povijesnih građevina u suvremeni kontekst, kada se suočavamo sa značajnom klimatskom i energetsom krizom, disertacija omogućuje se uvođenje kulturne dimenzije u sustav održivih inovacija. Kao što je su prevencija i recikliranje otpada pri vrhu hijerarhije gospodarenja otpadom EU, popravci i sanacije postojećih zgrada moraju imati prioritet u odnosu na novu gradnju gdje god je to moguće. Rješavanjem ovih pitanja, do izražaja dolaze alternativni, lokalno dostupni otpadni materijali poput pepela drvene biomase (PDB). Temeljem rezultata ovog istraživanja evaluiran je potencijal korištenja otpadnog PDB-a kao sastavne komponente bescementnog, hibridnog vapnenog veziva (AHL). Implementacija PDB-a u maticu prirodnog hidrauličkog vapna (NHL) omogućuje hibridnu formulaciju građevnog vapna s hidrauličkim svojstvima, koja je pogodna za primjenu u pri obnovi i popravku povijesnih građevina. Rezultati potvrđuju primjenjivost materijala poput mortova s AHL-om, ispunjavajući tehničke zahtjeve i uvjete kompatibilnosti s NHL-om, koji se koristi kao referentni materijal za obnovu i popravak povijesnih građevina. Isto tako predstavljaju platformu za usvajanje pozitivnog pristupa nekonvencionalnim materijalima te održivu obnovu povijesnih zgrada.

## dr. sc. Ksenija Tešić

### Životopis

Ksenija Tešić rođena je 27. studenog 1995. g. u Užicu, u Republici Srbiji. Diplomirala je 2020. g. završivši Sveučilišni diplomski studij, studijski program Građevinarstvo, modul za Konstrukcije na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Beogradu. Od srpnja 2020. do danas radi kao asistent na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, Zavod za materijale, gdje sudjeluje u nastavnim, znanstvenim i stručnim poslovima. Od 2021. godine do danas sudjelovala je u izradi niza stručnih poslova u području ocjene stanja konstrukcija. Ksenija objavljuje 17 znanstvenih članaka kao autor ili koautor, od kojih 6 u znanstvenim časopisima. Dobitnik je nagrada za najuspješnijeg doktoranda za 2020./2021. i 2021./2022. godinu, kao i nagradu za objavljeni članak za godine 2021./2022. i 2022./2023.

Mentor: izv. prof. dr. sc. **Ana Baričević**  
prof. dr. sc. **Nenad Gucunski**

Datum obrane: 28. 3. 2024.

### Naslov dokorskog rada

## Karakterizacija promjene signala georadara zbog korozije armature prouzročene kloridima u betonu

### Sažetak

Jedan od najzahtjevnijih problema u održavanju armiranobetonskih konstrukcija je korozija armature koja uzrokuje pojavu pukotina, raslojavanja i odvajanja zaštitnog sloja betona, što dalje dovodi do narušavanja cjelovitosti konstrukcije i problema sa njezinom nosivošću. Održiviji način kontrole ovog procesa može biti njegovo rano otkrivanje, čime bi popravci bili manje složeni, a ujedno znatno isplativiji. U konačnici, time bi se mogao produžiti uporabni vijek, što je u skladu sa strategijama održivog razvoja.

Georadar je nerazorna metoda ispitivanja koja se temelji na emisiji elektromagnetskih valova u materijal, te detektiranju valova reflektiranih od objekt. U ovom radu karakteristike reflektiranog vala od armaturene šipke u betonu korištene su za analizu korozijskog stanja armature. Pregledom literature zaključeno je da postoji neslaganje u zaključcima pojedinih laboratorijskih istraživanja, koje može potjecati od neadekvatnosti postavki eksperimentalnog sustava. Konkretno, vrijednosti promjene amplitude uslijed određenog stupnja korozije, pa čak i predznak promjene amplitude nije razjašnjen.

Ovim radom zaključeno je da pojava korozijskih produkata, vlage i klorida u zaštitnom sloju izaziva pad amplitude. Također, zaključeno je da neslaganja u zaključcima laboratorijskih istraživanja drugih autora potiču od nepravilnog položaja elektrolita u ubrzanom procesu korozije. Pored toga, zaključak rada je da izostanak modeliranja dielektričnih svojstava materijala kao kompleksnih veličina u numeričkim simulacijama dovodi do netočnih vrijednosti amplitude vala.

## dr. sc. Tomislav Rastovski

### Životopis

Tomislav Rastovski je magistrirao u području upravljanja građevinskim projektima. Nositelj je kolegija Projektni menadžment, Metodologija vođenja projekata, Upravljanje projektima i ICT alati u projektnom menadžmentu na Sveučilištu Algebra i gostujući predavač na Ekonomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na kolegiju Projektni menadžment. Izabran je u naslovno nastavno zvanje višeg predavača u interdisciplinarnom području znanosti Projektni menadžment. Ima više od 20 godina predavačkog iskustva iz područja Projektnog menadžmenta, korištenja informatičkih alata za upravljanje projektima i implementacije metodologije za upravljanje projektima. Osim nastave studentima održao je više od 200 stručnih seminara iz područja Projektnog menadžmenta za polaznike iz velikog broja hrvatskih i stranih kompanija iz svih grana gospodarstva na kojima je sudjelovalo ukupno preko 2000 polaznika. Osim toga, certificirani je voditelj složenih projekata (engl. IPMA Level B) i ispitivač (engl. IPMA Assessor) prema International Project Management Association, a svoje iskustvo kao voditelj projekata odnosno kao ekspert za planiranje, praćenje i kontrolu projekata je stekao radeći na više od 30 projekata u proteklih 20 godina za razne investitore kao konzultant i voditelj projekata. Ima također iskustvo u vođenju složenih projekata sufinanciranih od strane EU.

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

Datum obrane: 8.4.2024.

### Naslov doktorskog rada

## Modeliranje ključnoga skupa kompetencija za povećanje uspjeha upravljanja građevinskim projektima

### Sažetak

Voditelji građevinskih projekata, većinom inženjeri građevinarstva, se tijekom obrazovanja fokusiraju na unapređenje tehničkih kompetencijama. Ali kako se kompetencije voditelja projekta sastoje od tehničkih, bihevioralnih i kontekstualnih, današnje globalno tržište i promjenjivo radno okruženje od voditelja građevinskih projekata sve više zahtijevaju korištenje bihevioralnih i kontekstualnih kompetencija, posebice u složenim građevinskim projektima. Tijekom istraživanja je napravljen opsežan pregled literature iz područja kompetencija za upravljanje projektima u proteklih dvadeset godina s ciljem identifikacije nezavisnih varijabli istraživanja. Paralelno je napravljen opsežan pregled literature iz područja uspjeha projekta i uspjeha upravljanja projektom s ciljem identifikacije zavisnih varijabli istraživanja te identifikacije jedinstvenog skupa ključnih kompetencija. Metodologijom istraživanja je definiran način i plan provedbe istraživanja, a prikupljanje podataka je izvršeno putem strukturiranih intervjuja. Podaci su obrađeni metodom deskriptivne i inferencijalne statistike – modeliranja strukturnih jednadžbi s najmanjim kvadratima (PLS-SEM). Nakon provedenog istraživanja ostvareni su ciljevi istraživanja – definirana je razina utjecaja pojedinih kompetencija kod upravljanja građevinskim projektima te identificiran i po prvi puta je definiran jedinstven skup ključnih kompetencija koje značajno utječu na rok, cijenu i ciljeve u upravljanju građevinskim projektima čime je potvrđena hipoteza istraživanja.



## dr. sc. Ivan Hafner

### Životopis

Ivan Hafner rođen je 26. lipnja 1993. g. u Zagrebu, u Republici Hrvatskoj. Osnovnu školu završio je u Zagrebu, a XV. gimnaziju u Zagrebu, završio je 2012. g. Iste godine upisuje i Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je 2017. g. završivši Sveučilišni diplomski studij, usmjerenje Konstrukcije te stekao naziv magistar inženjer građevinarstva. Od veljače 2019. do danas radi kao asistent na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, gdje sudjeluje u nastavnim, znanstvenim i stručnim poslovima. U nastavi sudjeluje u pripremi i održavanju vježbi iz kolegija na Preddiplomskom sveučilišnom studiju te na Diplomskom sveučilišnom studiju. Od 2019. godine do danas objavio je niz znanstvenih radova u koautorstvu te je sudjelovao na nizu stručnih projekata.

Mentori: prof. dr. sc. **Tomislav Kišiček**

Datum obrane: 16. 5. 2024.

### Naslov doktorskog rada

## Unaprjeđenje potresnoga odgovora zida s jednostranim FRCM pojačanjem pomoću inovativnoga detalja prihvaćanja

### Sažetak

Zide je prepoznato kao jedan od najčešće korištenih građevinskih materijala na svijetu. Unatoč širokoj primjeni, zidane građevine suočavaju se sa značajnim izazovom vezanim uz potresnu otpornost. Niska vlačna čvrstoća zidanih konstrukcija čini ih osjetljivim na horizontalne sile, a ta je osjetljivost pojačana njihovom izgradnjom koja prethodi sveobuhvatnim seizmičkim propisima. Najranjiviji dijelovi ovakvih zgrada su zidovi smješteni u prizemlju između prozora. Zbog toga se procjena i sanacija ovakvih zidova moraju provoditi na visokoj razini. Jedna od najkorištenijih metoda za pojačanje takvih zidova je FRCM metoda. Glavna svrha FRCM metode je poboljšanje ponašanja zidova u vlaku. U ovoj disertaciji traženo je povećanje posmične nosivosti u ravnini te povećanje duktilnosti nepojačanih zidova te poboljšanje jednostrane primjene FRCM sustava korištenjem inovativnih detalja prihvaćanja. Za potrebe ove disertacije provedena je teorijska analiza unutar koje je procijenjeno ponašanje nepojačanih i pojačanih zidova. Nakon toga provedena su eksperimentalna ispitivanja koja su uključivala ispitivanja devet uzoraka zidova u punoj veličini. Tri uzorka su bila nepojačana, tri su bila pojačana FRCM sustavom s jedne strane i tri su bila pojačana FRCM sustavom s jedne strane uz dodatak novih i inovativnih detalja prihvaćanja na stranama zidova. Kao rezultati ispitivanja dobivena su početna krutost, maksimalni pomak i maksimalna horizontalna sila u ravnini zida. Kako bi se rezultati potvrdili, razvijeni su numerički modeli za sve vrste uzoraka. Usporedbom rezultata zaključeno je da dodavanje detalja prihvaćanja poboljšava duktilnost zidova dok nosivost unutar ravnine nije pod utjecajem detalja prihvaćanja.

## dr. sc. Tin Kulić

### Životopis

Tin Kulić rođen je 14. travnja 1994. g. u Splitu, u Republici Hrvatskoj. 2012. godine upisuje Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu. Diplomirao je 2015. g. završivši sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo, a iste godine upisuje sveučilišni diplomski studij građevinarstva na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, usmjerenje Hidrotehnika. Diplomirao je 2017. godine te stekao naziv magistar inženjer građevinarstva. Od listopada 2017. do kolovoza 2019. godine radio je kao stručni suradnik na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, od rujna 2019. do listopada bio je zaposlen u Centru Građevinskog fakulteta za projektiranje i nadzor nad gradnjom d.o.o. nakon čega je radio kao asistent na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu do travnja 2024. nakon čega se zaposlio kao projektant suradnik u Kulić-inženjerskom birou d.o.o. Sudjelovao je u brojnim stručnim i znanstvenim projektima te je, po potrebi, obavljao nastavnu djelatnost na kolegiju na Preddiplomskom sveučilišnom studiju. Uspješno je obranio doktorski rad 22. svibnja 2024. Trenutno je zaposlen u tvrtki HIDROKONZALT PROJEKTIRANJE d.o.o.

Mentori: prof. dr. sc. **Goran Lončar**

Datum obrane: 22.5.2024.

### Naslov doktorskog rada

## Razvoj modela zasnovanoga na agentima za primjenu u hidraulici okolišnoga i obalnoga inženjerstva

### Sažetak

Modeliranje zasnovano na agentima (dalje u tekstu: ABM) spada među inovativnije pristupe modeliranju prirodnih i društvenih procesa i sustava u kojima se oni odvijaju. ABM kao modelski pristup stavlja fokus na autonomne i interaktivne agente koji predstavljaju određene jedinice s mogućnošću prilagodbe drugim jedinkama ili pak promjenjivom okolišu u kojem se nalaze. U okviru ovoga doktorska rada ABM je primijenjen za analizu širenja potencijalno štetnih i invazivnih planktonskih oblika upuštenih brodskim balastnim vodama u lukama Jadranskoga mora kao jednoga od najučestalijih puteva unosa invazivnih vrsta u Jadransko more. Ovim su istraživanjem detaljno analizirane karakteristične okolišne situacije pri kojima se javljaju određeni obrasci pronosa modeliranih planktonskih zajednica, odnosno obrasci simuliranoga sekundarnog širenja sadržaja brodske balastne vode ispuštene na određenoj lokaciji unutar luke. U okviru razvijenih ABM-a znanstveni doprinos ostvaren je kroz definiranje matematičkih izraza za gibanje planktonskih frakcija vertikalno kroz stupac mora s obzirom na podražaje iz okoliša (3D polje temperature mora i intenzitet svjetlosti na dubini lokacije modelske čestice). Na temelju poveznice na relaciji okolišni uvjeti-obraci pronosa donesen je prijedlog operativnih mjera upravljanja balastnom vodom ukoliko postoji najava uplovljavanja broda koji planira isprazniti balastni tank unutar luke. Operativne mjere odnose se na dojavu plovila o promjeni lokacije ispuštanja ili pak odgodi ispuštanja balastne vode do trenutka nastupanja takvih okolišnih uvjeta da cirkulacija mora neće dovesti do značajnoga sekundarnog raspršenja. Nadalje, u okviru ovoga istraživanja izrađene su smjernice upravljanja brodskim balastnim vodama u koje su integrirane spomenute operativne mjere. Kroz smjernice s uključenim operativnim mjerama, donesenima na temelju rezultata simulacija zduženog HD modela cirkulacije i ABM-a pronosa, moguće je smanjiti prostorni obuhvat sekundarnog širenja potencijalno invazivnih vrsta unesenih brodskim balastnim vodama.

## dr. sc. Antonija Harasti

### Životopis

Antonija Harasti rođena je u Zagrebu 28. svibnja 1993. godine. Diplomirala je 2018. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Na istom fakultetu je od 2018. godine zaposlena kao asistentica na Zavodu za hidrotehniku kada upisuje i doktorski studij. U znanstveno istraživačkom sudjeluje na dva znanstvena projekta te je objavila 5 znanstvenih radova u časopisima i 15 radova na konferencijama. Unaprjeđuje djelatnost fakulteta kroz organizaciju znanstvenih konferencija, ugošćavanje stranih znanstvenika te u radu Fakultetskog vijeća. U stručnom radu bavi se izradom studija i elaborata, prikupljanjem terenskih podataka i implementacijom novih metodologija u Laboratoriju za riječnu dinamiku i pronos nanosa.

Mentor: izv. prof. dr. sc. **Gordon Gilja**

Datum obrane: 28. 05. 2024.

### Naslov dokorskog rada

## Doprinos utjecajnih parametara na podlokavanje oko stupova mostova zaštićenih riprapom

### Sažetak

Stupovi mostova u rijekama izloženi su lokalnoj eroziji, a najčešća metoda zaštite od podlokavanja je riprap – kameni nabačaj. Iako riprap štiti stup mosta, podlokavanje se nastavlja na nizvodnoj dionici korita gdje se javlja dosad neistraženi fenomen nastanka odbačene kaverne. Cilj istraživanja je prikupiti bazu podataka za iznalaženje zavisnosti između ravnotežnog stanja odbačene kaverne i utjecajnih varijabli. Uspostavom fizičkog i numeričkog modela provedeni su eksperimenti na karakterističnoj geometriji riprap zaštite u rasponu rubnih uvjeta u kojima se stupovi zaštićeni riprapom nalaze u prirodnom okruženju. Temeljna pretpostavka ovog istraživanja je da se morfodinamički procesi podlokavanja oko riprap zaštite mogu bolje opisati s lokalno izmjerenim hidrodinamičkim karakteristikama u odnosu na uobičajeno korištene globalno usrednjene varijable. Lokacije za prikupljanje lokalnih hidrodinamičkih varijabli su: pridreno područje iznad odbačene kaverne i područje uz stjenku stupa iznad riprap zaštite. Definirane lokacije predstavljaju područja na kojima je moguće kontinuirano pratiti hidrodinamičke varijable u prirodi. Analizom izvedenih empirijskih jednadžbi pokazano je da se lokalnim varijablama značajno poboljšava predikcija nizvodnih morfodinamičkih procesa. Ovom disertacijom određene su najutjecajnije karakteristike lokalnog polja tečenja kojima se može pouzdano predvidjeti dubina odbačene kaverne formirane uz riprap zaštitu stupa mosta.

## dr. sc. Luka Lulić

### Životopis

Tomislav Rastovski je magistrirao u području upravljanja građevinskim projektima. Nositelj je koLuka Lulić rođen je 1993. godine u Zagrebu, gdje je završio osnovnu i srednju školu. Od 2012. do 2016. godine studirao je na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu nakon čega je položio razlikovnu godinu na Građevinskom fakultetu u Zagrebu (GFZG) na kojem je i diplomirao 2019. godine na smjeru konstrukcije. Od 2020. godine zaposlen je na GFZG-u, na zavodu za konstrukcije kao asistent u sklopu znanstvenog projekta ARES. Aktivno sudjeluje u znanstvenom i stručnom poslu zavoda, primarno u području postojećih zidanih konstrukcija. U znanstvenom radu je aktivno sudjelovao na nekoliko međunarodnih konferencija, objavio je niz znanstvenih radova te je dobio nekoliko nagrada. Nakon niza razornih potresa u 2020. godini sudjelovao je na pregledima zgrada na zagrebačkom i petrinjskom području.

Mentori: izv. prof. dr. sc. **Mislav Stepinac**

Datum obrane: 12.6.2024.

### Naslov doktorskog rada

## **Određivanje mehaničkih svojstava nearmiranoga ziđa od pune opeke nerazornim i polurazornim metodama**

### Sažetak

Postojeće nearmirane zidane konstrukcije osjetljive su na potresnu pobudu te predstavljaju potencijalnu opasnost u slučaju novih snažnih podrhtavanja. Veliki broj i starost takvih konstrukcija dodatno naglašava problematiku. Stoga, od iznimne su važnosti obnova te redovito održavanje takvih konstrukcija. Kako bi proces obnove bio učinkovitiji, potrebno je što preciznije ocijeniti postojeće stanje nearmiranih zidanih konstrukcija, odnosno, odrediti njihova mehanička svojstva koja su s vremenom zasigurno degradirala. Zbog toga, terensko ispitivanje takvih konstrukcija predstavlja bitan korak u procesu obnove. U sklopu ovoga rada fokus je prvenstveno na metodi plosnatih preša, ali su također korištene još i posmična metoda, metoda brzine soničnog pulsa, odnosno sonični test te analiza indeksa kvalitete ziđa, odnosno MQI metoda. Tijekom istraživanja ispitano je više od 30 zgrada na preko 60 ispitnih mjesta. Korištene metode su detaljno opisane te je dan pregled postojećeg stanja. Nadalje, rezultati istih metoda detaljno su prikazani, pažljivo analizirani te uspoređeni. Istraživanje je potvrdilo očekivano loše stanje postojećih nearmiranih zidanih konstrukcija, naglasilo važnost njihove obnove, prikazalo sav potencijal korištenih metoda za daljnju uporabu prilikom ocjene stanja takvih konstrukcija te sugeriralo korekciju preporučenih referentnih vrijednosti promatranih parametara danih u novom prijedlogu norme.

## **dr. sc. Mladen Tomašković**

### **Životopis**

Rođen je 1990. u Zagrebu. Diplomirao je 2013. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Te je godine upisao poslijediplomski doktorski studij na istom fakultetu, a disertaciju je obranio 2024. godine. 2014. zaposlio se u građevinskom poduzeću Viadukt d.d. gdje radi do 2017. godine. Stručni ispit je položio 2016. godine, a 2017. se zapošljava u poduzeću Pedom asfalti d.o.o. u kojemu radi kao Glavni inženjer gradilišta i voditelj odjela niskogradnje na preko 30 projekata izgradnje i rekonstrukcije cesta i autocesta u Republici Hrvatskoj sve do 2024. kada se zapošljava u poduzeću Geotehnika d.o.o. na mjesto tehničkog direktora. Objavio je nekoliko radova te sudjelovao na konferencijama u zemlji. Član je Hrvatske komore inženjera građevinarstva te govori engleski jezik.

Mentori: prof. dr. sc. **Ivica Završki**

Datum obrane: 21. 6. 2024.

### **Naslov dokorskog rada**

## **Ugovorni model održavanja prometnica temeljen na učincima**

### **Sažetak**

Redovito održavanje prometnica uz opće prisutan zaostatak u održavanju cestovne infrastrukture te sve veći zahtjevi po pitanju cestovne sigurnosti stavljaju velik izazov pred tradicionalne modele održavanja temeljene na izvedenim količinama, a kao njihova alternativa nameću se modeli temeljeni na učincima. Postojeći modeli temeljeni na učincima ističu se po kompleksnosti njihova ugovaranja, a ovaj rad prikazuje razvoj ugovornog modela održavanja prometnica temeljenog na učincima iz aspekta odabira parametara održavanja s ciljem jednostavnijeg i efikasnijeg ugovaranja uz istovremeno postizanje ključnih prednosti održavanja temeljenog na učincima. Ugovornim modelom sve se navedeno postiže u fazi njegova formiranja odabirom minimalnog broja ključnih parametara održavanja koji istovremeno doprinose ostvarenju ključnih prednosti održavanja temeljenog na učincima. Osnovna pretpostavka modela leži u činjenici kako svaki parametar jednako doprinosi složenosti procesa ugovaranja i provedbe ugovora, a da svaki jednako ne doprinosi ostvarenju zadanih ciljeva niti ostvarenju ključnih prednosti. Nakon pregleda i analize dostupne literature navedeni su svi bitni elementi te rizici procesa odabira parametara kao i važnost njihove usklađenosti sa zakonskom regulativom, krajnjim ciljevima i cestovnom politikom. Formirani stručni tim definirao je način i vrednovanje odabira ukupnog broja ponuđenih parametara te iste odabrao, a validacija ugovornog modela izvršena je kroz dvije faze, putem anketnog upitnika te intervjuja sa stručnjacima koji posjeduju dugogodišnje iskustvo na projektima održavanja i rekonstrukcija prometnica. Provedenim istraživanjem dokazano je kako se primjenom predstavljenog modela održavanja smanjuje kompleksnost procesa ugovaranja, a istovremeno podiže efikasnost i učinkovitost održavanja prometnica te razina sigurnosti prometa.

ISSN 2991-3705



9 772991 370004 >