

# 2. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

12.-13. rujna 2016., Zagreb

Zbornik radova

Urednik  
STJEPAN LAKUŠIĆ





**Izdavač**

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zagreb, Kačićeva 26

**Urednik**

Prof.dr.sc. Stjepan Lakušić

**Dizajn naslovnice**

minimum d.o.o.

**Prijelom**

Tanja Vrančić

**Lektura**

Prof.dr.sc. Krešimir Fresl (hrvatski)  
Zoran Vulelija (engleski)

**Tisak**

Tiskara Zelina d.d., 2016.

**Naklada**

150 kom.

**ISBN**

978-953-6272-87-7

Zagreb, rujan 2016.

**CIP zapis**

je dostupan u računalnome katalogu  
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu  
pod brojem 000941919.

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

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

## **2. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA**

12.-13. rujna 2016., Zagreb

### **Zbornik radova**

Urednik

**Stjepan Lakušić**

## Organizacijski odbor simpozija

Prof.dr.sc.	<b>Stjepan Lakušić</b>	Prodekan za znanost
Prof.dr.sc.	<b>Meho Saša Kovačević</b>	Zavod za geotehniku
Doc.dr.sc.	<b>Dalibor Carević</b>	Zavod za hidrotehniku
Izv.prof.dr.sc.	<b>Ana Mandić Ivanković</b>	Zavod za konstrukcije
Doc.dr.sc.	<b>Sonja Gorjanc</b>	Zavod za matematiku
Prof.dr.sc.	<b>Ivana Banjad Pečur</b>	Zavod za materijale
Prof.dr.sc.	<b>Anita Cerić</b>	Zavod za organizaciju i ekonomiku građenja
Prof.dr.sc.	<b>Tatjana Rukavina</b>	Zavod za prometnice
Doc.dr.sc.	<b>Domagoj Damjanović</b>	Zavod za tehničku mehaniku
Doc.dr.sc.	<b>Silvio Bašić</b>	Zavod za zgradarstvo

## Predgovor

*Simpozij doktorskog studija građevinarstva Građevinskog fakulteta u Zagrebu* prvi je put održan 14. i 15. rujna 2015. godine kao otvoreni skup. Veliki interes koji su pokazali sudionici te konstruktivne i poticajne rasprave tijekom skupa potvrdili su ispravnost odluke o organiziranju tog simpozija. Postignuto iznimno zanimanje nakon održanih izlaganja doktoranada prve godine doktorskog studija te razmjene iskustava potaknuli su Odbor za znanost da i u idućim godinama nastavi s organizacijom *Simpozija doktorskog studija građevinarstva*. Upravo je organiziranje *Simpozija* obogatilo Istraživački seminar na našem doktorskome studiju.

*Simpozij doktorskog studija građevinarstva* uspostavljen je po uzoru na vrhunska svjetska sveučilišta, a zamišljen je tako da doktorandi radom pripremljenim s mentorom (studijskim voditeljem) predstavljaju trenutno stanje razvoja područja svoga znanstvenog usmjerenja, odnosno područja istraživanja budućega doktorskog rada. Javna prezentacija, razgovor i diskusija pružit će doktorandu dodatne smjernice za izradu plana istraživanja i omogućiti odabir odgovarajuće metode za provedbu istraživanja. Kako bi rezultati istraživanja bili što prije vidljivi i primjenjivi u praksi, vrlo je važno stvoriti model doktorskoga studija koji će osigurati aktivno istraživanje te potaknuti razvoj novih znanja u određenom području građevinarstva, a izradom doktorskog rada omogućiti da se dobiveni rezultati u cijelosti i prikažu. Na taj način doktorand pokazuje da može provesti samostalno istraživanje, često i interdisciplinarno te da je spreman za tržište rada u sklopu znanstvenih institucija ili u realnom sektoru. *Simpozij doktorskog studija* pokazao se prvom važnom stubom u procesu razvijanju vještina i stjecanja kompetencija doktoranada.

Za ovaj *2. simpozij doktorskog studija građevinarstva* svaki je doktorand prve godine studija priredio rad u koautorstvu s mentorom. Ukupno je priređeno 18 radova, od čega su 15 radova pripremili doktorandi i njihovi mentori s Građevinskog fakulteta u Zagrebu, 1 rad pripremljen je od strane doktorandi i njegovog mentora sa združenog doktorskog studija *Geo-engineering and Water Management*, dok su 2 rada pripremili doktorandi i njihovi mentori s Građevinskog fakulteta iz Osijeka. Svaki su rad recenzirala dva recenzenta. U drugom dijelu zbornika dani su sažeci svih disertacija koje su obranjene na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u razdoblju od 2011. do 2015. godine.

Zbornik *2. simpozija doktorskog studija građevinarstva* priređen je zahvaljujući velikom trudu svih autora, recenzenata i urednika. Velika pomoć u pripremi zbornika bili su i suradnici koji su pridonijeli da se dobije usklađenost radova svih autora. Priređeni su radovi iz svih područja građevinarstva: geotehnike, hidrotehnike, inženjerskih konstrukcija, materijala u građevinarstvu, mehanike konstrukcije, organizacija i ekonomike građenja te prometnica.

Nadam se da će ovaj skup još više potaknuti aktivno istraživanje u svim područjima građevinarstva te omogućiti razvoj novih znanja. Upravo poticanje istraživanja i stvaranje novih znanja osigurat će inovativnost i izvrsnost, što su najvažniji elementi za prepoznavanje našega fakulteta kao centra izvrsnosti u području građevinarstva.

Zagreb, 8. rujna 2016.

Urednik  
  
Prof.dr.sc. Stjepan Lakušić



# Sadržaj

Predgovor .....	5
Mogućnosti financiranja istraživanja u okviru doktorskoga studija kroz EU projekte Marko Bartolac .....	9
Učinak uronjenosti propusta na izmjenu vode kroz cijevni propust pod utjecajem valova Damjan Bujak, doc.dr.sc. Dalibor Carević .....	17
Ovisnost funkcija hidroenergetskog sustava o indikatorima klimatskih promjena Željko Pavlin, prof.dr.sc. Neven Kuspilić .....	27
Numerička analiza cirkulacije vode u marini s cijevnim propustima u tijelu lukobrana Ivana Bartolić, izv.prof.dr.sc. Goran Lončar .....	39
Hladnooblikovani tankostijeni C profili naprezani na savijanje Marko Ptiček, prof.dr.sc. Darko Dujmović .....	51
Učinci međudjelovanja tla i konstrukcije u projektiranju sukladno očekivanom odzivu Adriana Cerovečki, prof.dr.sc. Dragan Morić .....	63
Utjecaj otvora na seizmički odziv izvan svoje ravnine armiranobetonskih okvirnih konstrukcija ispunjenih zidom Filip Anić, doc.dr.sc. Davorin Penava .....	73
Određivanje duljine zaustavnoga puta na modernim kolničkim površinama Tomislav Dobrica, prof.dr.sc. Tatjana Rukavina .....	85
Optimalna duljina prijelaznoga područja na postojećim prugama Marko Vajdić, prof.dr.sc. Stjepan Lakušić .....	93
Oblikovanje cestovnih raskrižja u krivinama Šime Bezina, doc.dr.sc. Ivica Stančerić .....	107
Analiza skupljanja samozbijajućega betona eksperimentalnim i analitičkim metodama Mr.sc. Donka Würth, prof.dr.sc. Ivana Banjad Pečur .....	119
Upotreba recikliranoga betona kao agregata u spravljanju samozbijajućeg betona Hamdo Mešić, izv.prof.dr.sc. Marijan Skazlić .....	127
Određivanje mehaničkih karakteristika tla pomoću statičkog penetracijskog pokusa Gordana Ivoš, prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević .....	135
Numeričko modeliranje svodnoga djelovanja u nosivim platformama od armiranog tla Jelena Kaluđer, prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević .....	143
Inženjerskogeološko modeliranje diskontinuiteta u Dinarskom kršu s ciljem otkrivanja podzemnih krških pojava Bojan Vivoda, prof.dr.sc. Mladen Garašić .....	153



<b>Seizmičko i geološko mikrozoniranje zapadnoga dijela podsljemenske urbanizirane zone prema standardima Eurokoda 8</b>	
Ivan Kosović, izv.prof.dr.sc. Stjepan Strelec .....	161
<b>Modeliranje dugotrajnih deformacija stijenskog masiva oko podzemnog otvora</b>	
Zvonimir Maranić, prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević .....	169
<b>Implementacija i utjecaj standardiziranja informacijskog modeliranja gradnje (BIM) na građevinske poslovne sustave</b>	
Martina Pavlović, doc.dr.sc. Mladen Vukomanović .....	179
<b>Sažeci obranjenih disertacija: 2011. - 2015.</b> .....	193

# Mogućnosti financiranja istraživanja u okviru doktorskoga studija kroz EU projekte

dr.sc. Marko Bartolac

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, *mbartolac@grad.hr*

## Sažetak

Koncepcija doktorskoga studija u osnovi podrazumijeva da student pod nadzorom mentora provodi izvorna znanstvena istraživanja u nekom području kako bi ostvario znanstveni doprinos u rješavanju postojećeg problema. Uz neophodno poznavanje napredne teorijske pozadine promatranog problema i metodologije provođenja znanstvenog istraživanja, provedba spomenute koncepcije u području tehničkih znanosti uglavnom podrazumijeva i utrošak značajnih financijskih sredstava. U ovom su radu prikazane mogućnosti financiranja opisanih istraživanja kao i neke koristi koje iz njih proizlaze na primjeru europskog FP7 projekta *Anagennisi* na kojem je Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu jedan od partnera.

*Ključne riječi: doktorski studij, znanstveno istraživanje, financiranje, europski projekt*

## Possibilities for funding doctoral studies research through EU projects

### Abstract

The concept of doctoral studies basically implies that the student, supervised by mentor, conducts original scientific research in a given area in order to scientifically contribute to the resolution of an existing problem. Besides acquisition of advanced theoretical data on the problem under study, and knowledge of methodology for the conduct of scientific research, the realization of the aforementioned concept in the area of technical sciences usually implies substantial financial funding. Possibilities for funding the described research are presented in the paper, along with some related benefits, based on the example of the European FP7 *Anagennisi Project* on which the Faculty of Civil Engineering of the University of Zagreb participates as one of the partners.

*Key words: doctoral study, scientific research, financing, European project*

## 1 Uvod

Doktorski studij predstavlja temelj znanstvenoistraživačke djelatnosti svakog doktoranda i iznimno snažno utječe na cjeloživotni napredak budućih doktora znanosti. Provedba izvornih znanstvenih istraživanja u sklopu doktorskih studija u tehničkom području, uz ostale preduvjete iz sektora ljudskih i tehničkih potencijala, uglavnom iziskuje i znatna financijska sredstva. Uz ujednačeno niska proračunska izdvajanja Republike Hrvatske za istraživanja i razvoj u nekoliko proteklih godina (0,71 % BDP-a u 2014. godini prema [1], prosjek EU-28 2,03 % BDP-a u 2014. godini prema [2]) te nezavidnu situaciju većine preostalih tvrtki u industriji, hrvatske znanstvenoistraživačke ustanove primorane su okrenuti se novim izvorima financiranja ako žele držati korak s inozemnim ustanovama koje im predstavljaju uzore u svojem području djelovanja. Ti su izvori prije svega različiti programi u sklopu financiranja istraživanja i razvoja (eng. *Research and Development* - R & D) koje provode tijela Europske unije. Brzina prilagodbe hrvatskih znanstvenoistraživačkih ustanova prema svim je relevantnim dionicima tog procesa spora i dostupna sredstva ostaju u velikoj mjeri neiskorištena. Razloga za takvu situaciju je mnogo, a neki od glavnih su višegodišnji rad hrvatskih znanstvenika bez značajnije suradnje s kvalitetnim inozemnim partnerima te njihova nedovoljna educiranost o preduvjetima potrebnima za uspješno povlačenje prijekopotrebnih sredstava iz programa Europske unije. Naime, EU projekti se temelje upravo na tim parametrima: kvalitetan rad uz primjenu suvremene metodologije znanstvenog istraživanja, suradnja između znanstvenika zemalja članica Europske unije i šire te poznavanje postupka sastavljanja projektnih prijedloga koji su potencijalni dobitnici financijskih sredstava. Jedan od takvih prijedloga je i FP7 projekt *Anagennisi* [3] na kojem je Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu jedan od partnera.

U radu su opisane okolnosti provedbe istraživanja tijekom dokorskog studija za vrijeme rada na projektu *Anagennisi* te su dani određeni primjeri i preporuke doktorandima kako bi što bolje iskoristili sve dostupne resurse i postali uspješni znanstvenici na korist društva u cjelini.

## 2 EU projekt Anagennisi

### 2.1 Općenito o projektu

Projekt *Anagennisi*, punoga naziva *Anagennisi - Innovative Reuse of All Tyre Components in Concrete*, financiran je u sklopu sedmog okvirnog programa Europske unije za istraživanje i inovacije (FP7). Već iz samoga naziva projekta vidljiv je i njegov glavni cilj – pronaći primjenu za sve proizvode reciklaže otpadnih auto guma u betonskoj industriji. Naime, još 2006. godine zabranjeno je odlaganje cjelovitih otpadnih auto guma u svim zemljama članicama Europske unije te je obvezno njihovo dezintegriranje i reciklaža

sastavnih dijelova, a to su guma, čelična vlakna i polimerna vlakna (slika 1.). Dakle, radi se o vrlo aktualnom i realnom problemu za koji znanstvenoistraživačka zajednica u nekoliko država Europske unije, ali i u nekoliko država u svijetu, pokušava pronaći održivo rješenje.



Slika 1. Sastavni dijelovi auto guma: guma, čelična vlakna, polimerna vlakna

Na projektu sudjeluje 17 partnera iz osam europskih država (fakulteti–znanstvenoistraživačke institucije, srednje i male tvrtke, multinacionalne tvrtke, međunarodne organizacije), a koordinator projekta je Sveučilište u Sheffieldu, odnosno profesor Kypros Pilakoutas. Okosnicu projekta čini sedam sastavnih dijelova, tzv. radnih paketa (eng. *Work Package* - WP), u kojima je detaljno opisan administrativni i tehnički tijek projekta te odgovornosti svakog od partnera. Od svih radnih paketa, jezgru projekta čine upravo oni u kojima se istražuju nove mogućnosti primjene ranije spomenutih produkata reciklaže otpadnih auto guma. Ukupni proračun projekta je oko 4,5 milijuna eura od kojih se oko 65 % odnosi na troškove provođenja temeljnih istraživanja, oko 28 % na troškove demonstracije rezultata temeljnih istraživanja na realnim primjerima građevinskih elemenata i konstrukcija, a ostatak sredstava se odnosi na troškove upravljanja projektom (administracija, projektni sastanci itd.) i ostale manje troškove. Valja napomenuti da troškove provođenja temeljnih istraživanja Europska unija sufinancira sa 75 %, troškove demonstracije s 50 %, a preostale troškove sa 100 %. To podrazumijeva da partneri u projektu moraju u realizaciju istoga uložiti i vlastita sredstva u obliku radnih sati svojih djelatnika, znanstvene opreme i slično.

## 2.2 Građevinski fakultet u projektu Anagennisi

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu ima važnu ulogu u projektu *Anagennisi* kao koordinator konzorcija sastavljenoga od četiri srednje i male tvrtke iz Hrvatske te jedne srednje tvrtke iz Bosne i Hercegovine. Također, fakultet je aktivno uključen u šest od ukupno sedam radnih paketa u projektu, od kojih u jednom ima i odgovornost

voditelja (WP4 – Upotreba recikliranih polimernih vlakana u betonu). Zavodi Građevinskog fakulteta koji sudjeluju u projektu su Zavod za materijale i Zavod za tehničku mehaniku.

No, kako je uopće došlo do sudjelovanja Građevinskog fakulteta u tako velikom projektu kao što je *Anagennis*? Kako je ranije navedeno, problemom nalaženja primjene za produkte reciklaže otpadnih auto guma znanstvenoistraživačka zajednica počela se intenzivnije baviti relativno nedavno, u prošlom desetljeću. Jedan od pionira u ovom području je istraživačka grupa sa Sveučilišta u Sheffieldu. Njihova istraživanja datiraju s početka 2000-ih godina. Otprilike deset godina kasnije, potkraj 2000-ih godina, ovom temom počinje se baviti i istraživačka grupa na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, u suradnji Zavoda za prometnice i Zavoda za materijale. Istraživanja su krenula s ispitivanjem svojstava betona s recikliranom gumom i osmišljavanjem mogućnosti za praktičnu primjenu takvog betona. Osmišljen je inovativan proizvod komercijalnog naziva Ruconbar [4] (skraćeno od eng. *Rubberized Concrete Noise Barriers*), a radi se o apsorbirajućoj barijeri za zaštitu od buke izrađenoj od betona s recikliranom gumom. Ovaj su proizvod prepoznali investitori u praksi te se rabi za zaštitu od buke na mnogim cestovnim i željezničkim prometnim pravicima (slika 2.).



Slika 2. Ruconbar apsorbirajuća barijera za zaštitu od buke na autocesti Zagreb-Sisak

Nakon istraživanja s recikliranom gumom, djelatnici fakulteta počinju istraživati i svojstva betona s recikliranim čeličnim i polimernim vlaknima iz otpadnih auto guma. Jedno u nizu takvih istraživanja, ono o mehaničkim svojstvima betona visokih čvrstoća armiranog recikliranim čeličnim vlaknima iz otpadnih auto guma, prezentirano je u Portugalu 2012. godine široj znanstvenoistraživačkoj zajednici na izrazito kvalitetnoj konferenciji koju je organizirao RILEM, čuvena međunarodna udruga laboratorija i stručnjaka u području građevinskih materijala, sustava i konstrukcija (eng. RILEM – *International union of laboratories and experts in construction materials, systems and*

structures). Na toj su konferenciji predstavljena su istraživanja Građevinskog fakulteta iz Zagreba te je uspostavljen kontakt sa znanstvenicima sa Sveučilišta u Sheffieldu. Ostvaren je izravan kontakt s vodećim znanstvenicima u području od interesa, omogućena je neposredna razmjena iskustava i mišljenja te su iskazani međusobni interesi i stvoreni preduvjeti za zajedničku suradnju na budućim projektima. Upravo to je pravi način za umrežavanje – neposredna komunikacija s potencijalnim partnerima tijekom koje se prezentiraju rezultati vlastitih istraživanja, iskazuje interes za rezultate istraživanja druge strane i preispituju mogućnosti zajedničke suradnje u budućnosti. Valja svakako spomenuti da je sudjelovanje Građevinskog fakulteta u projektu *Anagennisi* direktan rezultat uspješnoga umrežavanja na spomenutoj konferenciji. Odmah po završetku konferencije zainteresirane strane pokreću ideju i pregovore o prijavi europskoga projekta kojim bi se istraživala primjena svih proizvoda reciklaže otpadnih auto guma u betonskoj industriji. Naime, do tada su u tom području postojali uglavnom manji projekti u kojima je istraživana primjena samo reciklirane gume ili samo recikliranih čeličnih vlakana, dok projekata u kojima je istraživana primjena recikliranih polimernih vlakana uopće nije ni bilo. Pisanje takvoga projekta dug je i zahtjevan proces koji u većini slučajeva uključuje brojne dionike, od znanstvenoistraživačkih institucija, industrijskih partnera, stručnih udruženja, upravnih tijela država itd. Građevinski fakultet u ovom se procesu otpočeka istaknuo kao kvalitetan dionik i u projekt je uključio nekoliko lokalnih industrijskih partnera oformivši konzorcij s ciljem da zajedno što bolje nauče principe rada u takvom projektu kako bi ih mogli primjenjivati u svom budućem radu. Projektni prijedlog dobio je financiranje Europske unije s početkom 2014. godine na rok od 3,5 godine, a konzorcij lokalnih partnera predvođen Građevinskim fakultetom postao je ravnopravan čimbenik u cijeloj priči zajedno s renomiranim znanstvenoistraživačkim institucijama kao što su primjerice Sveučilište u Sheffieldu ili Imperial College iz Londona.

### 2.3 Rad na projektu iz perspektive doktoranda

U ovom poglavlju se iznose vlastita iskustva, ali pretpostavljam da i ostale kolege u ova-kvoj situaciji imaju slična razmišljanja. Iako osobno nisam sudjelovao u pisanju prijave za projekt *Anagennisi*, moj Zavod (Zavod za tehničku mehaniku) bio je u to uključen preko drugih kolega. Neposredno prije formalnoga početka projekta, kada je dobivena pro-lazna ocjena nadležnih tijela Europske komisije, pojavila se mogućnost da sudjelujem i da u sklopu projekta provedem do kraja istraživanje u okviru izrade svoje doktorske disertacije. Nisam ni trenutka dvojio, prilika za rad na takvom projektu i u zajednici s takvim partnerima se ne propušta. Područja mog interesa u tom trenutku bila su ponašanje armiranobetonskih greda sa čeličnim vlaknima i bez njih pri brzom opterećenju (udaru) i pri dominantnom djelovanju poprečne sile. Kako bih mogao nastaviti istraživa-nje u tom smjeru, uključio sam se u rad na trećem radnom paketu projekta koji se bavi upotrebom recikliranih čeličnih vlakana u betonu i radio sam na primjeni tog proizvoda u stropnim i temeljnim pločama opterećenima na proboj.

Kao što je objašnjeno ranije, veliki dio troškova provođenja istraživanja financira se izravno iz projekta, ali isto tako znatan broj radnih sati i velikim dijelom vlastita znanstvena oprema nešto je što svaki partner mora dati za projekt. U mojem slučaju konkretno, sredstva projekta su utrošena za izradu uzoraka za ispitivanje i kupovinu sitnije opreme, dok je za provedbu ispitivanja rabljena postojeća oprema Laboratorija za ispitivanje konstrukcija Građevinskog fakulteta.

Ono što je izrazito korisno, a projekt omogućava, potpuno je financiranje odlazaka na projektne sastanke i konferencije. Projektne sastanci u pravilu se održavaju svakih šest mjeseci, traju po nekoliko dana, a na njima se okupljaju predstavnici svih partnera u projektu. Između projektne sastanaka održavaju se stalni kontakti između pojedinih sudionika ili manjih skupina sudionika projekta putem ostalih načina komunikacije kao što su npr. *online* sastanci. Na projektne sastancima prezentiraju se rezultati provedenih istraživanja, o njima se diskutira i planiraju se buduća istraživanja. Prisustvovanje je tim sastancima dragocjeno za doktorande, jer su u mogućnosti iz prve ruke naučiti vještine iz područja provedbe i prezentacije rezultata znanstvenih istraživanja, vođenja projekta te konstruktivne i argumentirane diskusije. Dobiti komentare i savjete vezane uz vlastito istraživanje (eng. *feedback*) u takvom krugu ljudi izuzetno je korisno. Isto tako, to je dobra prilika za upoznavanje drugih sudionika u projektu i ostvarivanje kontakata korisnih u budućnosti.

Osim prezentacije istraživanja na projektne sastancima koji predstavljaju neku vrstu publike interne razine (jer se ipak radi isključivo o sudionicima projekta), nezaobilazna je i prezentacija na konferencijama. Općenito, predstavljanje istraživanja široj društvenoj zajednici izvan projekta predstavlja vrlo važnu stavku u projektu. Svi oblici tog predstavljanja zajednički se nazivaju diseminacija (od eng. *dissemination* – širenje informacija) i osim konferencija uključuju i npr. predstavljanje projekta putem različitih medija (novine, radio, televizija, mrežne stranice), posebno organiziranih predavanja, radionica i slično. Iako se doktorandi mogu uključiti u sve spomenute vrste diseminacije, kvalitetne konferencije su događaji na kojima se može najviše naučiti, odnosno od sudjelovanja na njima može se puno profitirati. Sjetimo se samo kako je počela priča sa sudjelovanjem Građevinskog fakulteta u projektu *Anagennis!* Valja napomenuti da u stvarnosti izlaganja istraživanja na konferencijama najčešće nisu popraćena pitanjima iz publike i diskusijom, iako je to vrlo poželjno i, štoviše, uvršteno u vremenski raspored svake konferencije. Ova pojava je razumljiva s obzirom na to da je većini ljudi neugodno komentirati nečiji rad ispred nekoliko desetina (a možda i više) uglavnom nepoznatih ljudi. Zbog toga se uglavnom pristupa izlagačima nakon završetka prezentacije, kako bi se postavilo neko pitanje ili diskutiralo o prezentiranom istraživanju. Doktorandi moraju biti ti koji pristupaju drugim sudionicima koji rade u sličnom ili istom području, predstavljaju sebe i svoj rad te diskutiraju s tim ljudima o njihovom radu. Nepreuzimanje inicijative u ovim situacijama najčešće rezultira nekapitaliziranim odlaskom na konferenciju i tako nešto može se dogoditi nekoliko puta dok osoba ne stekne osjećaj sigurnosti u sebe, ali postaje problem ako se osoba nikako ne uspijeva "osloboditi". Na

moćnost da će netko prvi prići vama i započeti diskusiju ne treba uopće računati, jer je vjerojatnost da se to dogodi relativno mala. Cjelokupnu situaciju olakšava činjenica da na konferencijama uz iskusne i starije znanstvenike uglavnom sudjeluju i njihovi mlađi asistenti s kojima je doktorandima lakše uspostaviti komunikaciju i na taj način se njihovo mišljenje može lakše prenijeti na željenu "adresu". Međutim, valja napomenuti i da su renomirani znanstvenici u većini slučajeva pristupačni ljudi koji će rado izmijeniti nekoliko rečenica s mlađim kolegama koje im se ljubazno obrate. Dakle, upoznavanje, diskusija, razmjena kontakt podataka i naknadna razmjena znanstvenih radova pravi su koraci u postupku umrežavanja, odnosno stvaranja mreže kontakata u znanstveno-istraživačkoj zajednici.

### 3 Ishodi rada na europskom projektu

Ishodi rada na europskom projektu za svaku istraživačku grupu i svakog pojedinog člana te grupe mogu biti izuzetno pozitivni, ali traže puno uloženoga rada. Jasno, s većim brojem sudjelovanja na tim projektima (odnosno stjecanjem iskustva), stječe se i sposobnost "čitanja igre" te se ulogi mogu postupno smanjivati, a broj pozitivnih ishoda proporcionalno povećavati. U smislu potrebnih administrativnih potencijala za realizaciju europskog projekta hrvatske institucije zaostaju za razvijenim europskim državama u kojima slične institucije imaju zaposlene namjenski školovane djelatnike kako bi se od tih obaveza oslobodilo znanstvenike. Takva je koncepcija nažalost nepoznata najvećem broju hrvatskih znanstvenoistraživačkih institucija. U smislu ljudskih i tehničkih potencijala također postoji određeno kašnjenje za razvijenim državama, koje je prije svega uzrokovano nedovoljnim ulaganjima u sektor znanosti i visokog obrazovanja (vidjeti Poglavlje 1.). Iako se hrvatski znanstvenici unatoč opisanim poteškoćama silno trude i nastoje uključiti u suvremene znanstvene krugove, činjenica je da ipak uče na teži način i da će im stoga u većini znanstvenih disciplina trebati više vremena da postanu članovi "1. lige".

EU projekti u kojima je Građevinski fakultet u Zagrebu sudjelovao ili na kojima još sudjeluje, kao što je i projekt *Anagennisi* su puno pridonijeli da se Građevinski fakultet pozicionira na karti Europe u području građevinske znanosti. Uz brojne ostvarene kontakte u inozemstvu, brojne naučene vještine te stečena znanja i iskustva, svakako treba istaknuti i stasanje znanstvenog pomlatka institucije – dosad su iz projekta *Anagennisi* proizašla dva doktorata znanosti, a očekuje ih se i u narednom periodu. Iskustva iz projekta pomogla su određenom broju kolega da lakše pronađu postdoktorske pozicije u inozemstvu ili ostvare kratkoročna i srednjoročna znanstvena usavršavanja na inozemnim institucijama. Bilo koji od nabrojanih aranžmana rada je neizbježna potreba u svijetu znanosti koja u području hrvatskog građevinarstva još nije ni približno dovoljno implementirana. Na toj implementaciji treba snažno raditi, jer sva tako stečena znanja nisu samo na dobrobit dotičnih mladih znanstvenika, već su i na dobrobit njihove matične institucije te svih njihovih budućih studenata.



## 4 Zaključak

U ovom je radu prikazano iskustvo rada na europskom projektu za vrijeme doktorskog studija te su opisane neke situacije od izrazite važnosti za doktorande. Dani su određeni primjeri te prijedlozi za kvalitetniji tijek njihovog doktorskog studija i prepoznavanje prioriteta na tom putu. Doktorandi su ti koji se za vrijeme svog studija, uz kvalitetan znanstveni rad pod nadzorom i uz savjete mentora, moraju svim silama boriti za stjecanje što je više moguće inozemnih kontakata i iskustava. Moraju ustrajati u pronalaženju programa, tj. izvora financiranja bilo koje vrste koji će im to omogućiti, jer je to jedini način da postanu uspješni i međunarodno prepoznati znanstvenici.

## Literatura

- [1] Proračunska izdvajanja za istraživanje i razvoj u Republici Hrvatskoj, 2014.-2015., [www.dzs.hr](http://www.dzs.hr)
- [2] Proračunska izdvajanja za istraživanje i razvoj u europskim državama, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>
- [3] Europski FP7 projekt *Anagennisi*, [www.anagennisi.org](http://www.anagennisi.org)
- [4] Europski *Eco Innovation* projekt Ruconbar, [www.ruconbar.com](http://www.ruconbar.com)

# Učinak uronjenosti propusta na izmjenu vode kroz cijevni propust pod utjecajem valova

Damjan Bujak<sup>1</sup>, doc.dr.sc. Dalibor Carević<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, [dbujak@grad.hr](mailto:dbujak@grad.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, [car@grad.hr](mailto:car@grad.hr)

## Sažetak

Dugo se vjerovalo da transmisija valne energije implicira izmjenu vode kroz cijevni propust ugrađen u lukobranu. Međutim, posljednja istraživanja upućuju na mogući neovisan odnos valne transmisije i izmjene vode, te zanemarivu izmjenu vode zbog djelovanja vjetrovnih valova u slučaju potpuno potopljenoga cijevnog propusta. Ispitivanja na fizičkom modelu, mjereći direktno brzine, upućuju na značajnu izmjenu vode u slučaju malog omjera duljine propusta i valne duljine. Uz to je uočena višestruko brža izmjena vode kad je os propusta visinski postavljena na srednju razinu mora.

*Ključne riječi: izmjena vode, cijevni propust, fizikalni model, lukobran, vjetrovni valovi*

## Effects of culvert submergence on wave propagation through flushing culvert

### Abstract

It has long been believed that the transmission of wave energy implies water flow through a flushing culvert installed in the breakwater. However, recent studies have pointed to a possible independent relationship between wave transmission and water flow, and to a negligible exchange of water due to wind waves in case of a fully submerged flushing culvert. Physical model tests, based on direct velocity measurements, have revealed a significant water exchange in case of a small flushing culvert length to wavelength ratio. Multiple times faster water flows have been observed when the flushing culvert axis is placed at the mean sea level.

*Key words: water exchange, flushing culvert, physical model, breakwater, wind waves*

## 1 Uvod

Lukobrani fizički odvajaju akvatorij luke od okolnoga mora po cijeloj dubini te posljedično sprečavaju prirodnu cirkulaciju i izmjenu vode između mora unutar luke i okolnog mora. Nedovoljna izmjena vode može rezultirati kvalitetom mora okarakterizirane smanjenom količinom otopljenog kisika, što pogoduje razvoju algi (cvjetanje mora) te posljedično može ugroziti riblji fond i stanište, kao i ekosustav. Radi izbjegavanja stagnacije vode poprilična je pozornost u proteklih 10–15 godina bila posvećivana procedurama Studija utjecaja zahvata na okoliš (u Hrvatskoj). Također, marine imaju stroge zahtjeve po pitanju kvalitete mora, jer nautičari redovito borave na svojim plovilima u marinama. Narušena kvaliteta mora unutar luke može biti izbjegnuta smanjenjem potencijalnih izvora onečišćenja ili/i održavanjem optimalne izmjene mora. Dosadašnje su studije pokazale da prikladna izmjena vode poboljšava kvalitetu vode i pomaže održanju biološke produktivnosti i estetskih vrijednosti [1]. Cirkulacija mora između luke i okolnoga mora odvija se pod utjecajem prirodnih čimbenika poput plimne oscilacija, barokline cirkulacije (cirkulaciju koju pokreću značajne razlike u temperaturi i salinitetu unutar mora uzrokovane podvodnim slatkovodnim izvorima i riječnim dotokom u luku), utjecajem vjetra i valne klime [2, 3]. Pretpostavljeno je da su ovi procesi neovisni, što omogućuje analizu osnovnih fizičkih koncepcija odvojeno. Nije nužno da su dominantni svi utjecaji istovremeno, te će djelovanje pojedinih čimbenika ovisiti o geografskoj lokaciji. U svjetskim su morima plimne oscilacije u pravilu dominantni uzrok izmjene vode između mora unutar luke i okolnoga mora. Problem slabe cirkulacije gotovo je nezaobilazan u Jadranskom moru (kao i u cijelom Mediteranu) koje ima razmjerno mali raspon plimnih oscilacija u usporedbi s ostalim svjetskim morima, što rezultira reduciranom izmjenom vode tijekom jednog perioda plime u Jadranu.

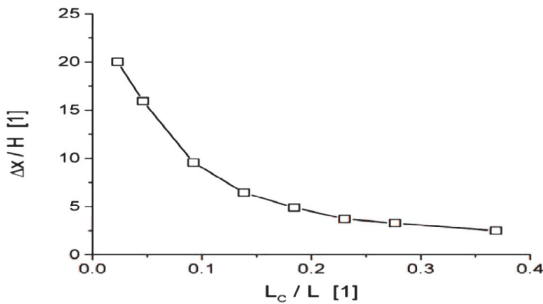
Stoga je bitan čimbenik koji se mora razmatrati pri projektiranju i gradnji luka i marina kvaliteta mora u akvatoriju, koja ovisi o izmjeni vode između luke i okolnoga vodnog tijela [4]. Izmjena mora uvjetovana je konstrukcijskim parametrima kao što su tlocrtni oblik luke, dimenzije ulaza u luku, dubina vode i nagib dna, što je do sada dobro istraženo [5, 6]. U područjima s malom oscilacijom plime i oseke (primjerice Jadransko i Egejsko more), gdje postoje male razlike plime i oseke [7], ili kod poluzatvorenih i zatvorenih zaljeva, gdje postoji slaba plimna cirkulacija, primjena cijevnih je propusta (cijevni ili pravokutni otvori u tijelu lukobrana, promjer/dimenzija  $D \sim 1$  m) opravdana. Funkcioniranje cijevnih propusta u lukama nije dovoljno istraženo, pa je danas njihova izvedba prepuštena slobodnoj procjeni projekatanta, premda je korištenje cijevnih propusta najjeftinija korištena metoda u lučkom inženjerstvu za poboljšanje izmjene mora. Provedeni radovi povezani sa cijevnim propustima djelomično prikazuju osnovne fizičke procese o funkcioniranju cijevnih propusta, te se bave samo djelovanjem vjetra i djelovanjem valova.

Parametar koji se uobičajeno upotrebljava kao mjera učinkovitosti izmjene vode u lukama vrijeme je zadržavanja (eng. *residence time*)  $T_r$  [8]. To je vrijeme potrebno da odre-

đeni fragment vode lučkog akvatorija napusti luku ("e-folding" vrijeme). U slučaju malih akvatorija pretpostavka dobro izmiješanoga bazena pojednostavljuje model i značenje "vremena zadržavanja" kao vremena potrebnog da se sva voda u lučkom bazenu izmjeni vanjskom vodom.

Površinski vjetrovni valovi koji nailaze na konstrukciju lukobrana definirani su brzinom i smjerom vjetra. U tom procesu cijevni propusti pod djelovanjem valova omogućuju protok mora kroz tijelo lukobrana obogaćujući lučke "mrtve zone" svježim morem [9]. Provedene su analize na fizikalnom modelu (1:80) za marinu Marmaris u Turskoj, pri čemu je istražen utjecaj valne pumpe [10] na izmjenu mora u toj marini [7]. Autori su izvijestili da dubokovodni valovi visine 0,75 m mogu prouzročiti samo slabe struje u blizini ulaznoga kanala. Također su istražili dva otvora u tijelu lukobrana izložena dolaznim valovima, te su zaključili da je izmjena mora uzrokovana valovima lokalna i beznačajna. Rad valne pumpe [10] je istražen, numerički i eksperimentalno za marinu Datca (Turska) [11]. Upotrijebljeno je modelsko mjerilo 1:100 i dolazni značajni valovi od 1,5 m. Pronađeno je da je primjena valne pumpe u ovoj marini rezultirala boljom kvalitetom vode. Navedena su dva istraživanja kontradiktorna, što je možda uzrokovano različitim dolaznim valnim visinama primijenjenima u modelima.

Opširnija mjerenja valne transmisije provedena su kroz pravokutne propuste u valnom kanalu i valnom bazenu [9]. Autori su razvili empirijske relacije između koeficijenata transmisije i karakterističnih geometrijskih i valnih parametara (širina, visina, duljina propusta, dubina vode, uronjenost) i dolaznih valnih parametara. Pronađeno je da se koeficijent transmisije  $K_t$  povećava s povećanjem dubine uranjanja, širine propusta, valnog perioda, dok duljina propusta i valna visina imaju suprotan utjecaj na  $K_t$ . Također je uočeno da je  $K_t$  veći za valove koji nailaze pod manjim kutom na odnosu na os cijevi. Izvršena su detaljna eksperimentalna istraživanja u valnom kanalu usredotočena na utjecaj dubokovodnih dolaznih valova na koeficijente valne transmisije i protok vode kroz propuste [12]. Autori su varirali duljinu i uronjenost propusta, mjereći pritom transmitirane valove i brzine u propustima. Zaključeno je da transmisija valova ne znači nužno i jednosmjerni protok kroz propuste i da uronjeni propusti mogu biti jednako učinkoviti kao i oni smješteni na vodno lice. Autori su dali kvalitativan odnos između parametara dolaznih valova i protoka kroz propuste u teorijskom modelu (slika 1., gdje je  $\Delta x = v \cdot t$ ;  $t$  je jedinična mjera vremena) s pretpostavkom hidrostatskog rasporeda tlaka, te su dali općenite zaključke. Predlažu da prethodne ideje o propustima kao elementima za izmjenu vode treba revidirati u duhu novih spoznaja. Istraživanje upućuje na zanemariv utjecaj valova na djelovanje cijevnih propusta, ali ovi su zaključci dosegnuti korištenjem modela u malom mjerilu, gdje je moguć nezanemariv utjecaj kapilarnih sila, i uporabom pravilnih valova (monokromatskim), dok u prirodi postoje samo nepravilni valovi u prirodom mjerilu.



Slika 1. Teorijski model ( $\Delta x = v \cdot t$ ) [12]; H - valna visina; L - valna duljina;  $L_c$  - duljina cijevnog propusta

Dugo se podrazumijevala ovisnost između valne transmisije i protoka kroz cijevni propust, ali posljednja ispitivanja upućuju na njihov neovisan odnos. Posljednja istraživanja također upućuju na zanemariv utjecaj valova na eliminaciju stagnacije vode u akvatoriju, ali ta su istraživanja bila izvršena samo za potpuno uronjeni cijevni propust pod utjecajem monokromatskih valova i na modelima manjega mjerila.

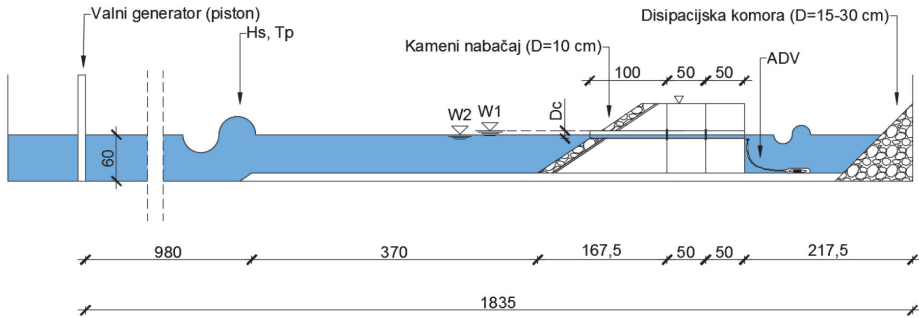
U ovom se radu izmjena vode posredno kroz brzinu ispitivala na fizičkom modelu većega mjerila uporabom spektralnih valova koji su prikladniji za opis valne klime u prirodi. Reprezentativan skup mjerenja izvršen je mijenjajući više parametara vala i cijevnog propusta: valna visina, valna duljina, uronjenost, duljina i promjer cijevnog propusta.

Očekuje se dobiti bolji uvid u hidrodinamičko funkcioniranje cijevnih propusta, odnosno utjecaj pojedinih geometrijskih karakteristika propusta i parametara vala na realno strujanje koje se odvija u propustu pod utjecajem vjetrovnih valova. Nadalje, očekuje se otkriti na koje je dominante čimbenike brzina u propustu najosjetljivija, s posebnom pozornošću na razlike između djelomično uronjenog i potpunog uronjenog propusta, što je manje istraženo, te usporediti rezultate ispitivanja s teorijskim modelima i preporukama u prethodnim istraživanjima.

## 2 Metodologija

Valni kanal koji je upotrijebljen nalazi se u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu (slika 2.). Dimenzije su valnog kanala  $18,35 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}$  (duljina  $\times$  širina  $\times$  visina). Fizički model lukobrana s ugrađenim cijevnim propustom izrađen je prihvaćanjem duljinskog mjerila  $\lambda = 10$ , te je postavljen u valni kanal ispred disipacijske komore kojoj je svrha što učinkovitije smanjiti refleksiju valova od kraja valnog kanala kako bi se umanjio učinak modela (slika 2.). Bazen za umirenje valova u kojoj se nalazi disipacijska komora predstavlja akvatorij marine koji lukobran štiti. S obzirom da je duljina lukobrana u prirodnom mjerilu u horizontalnom presjeku na mjestu propusta obično u rasponu između 5 m i 25 m, istraživanje je provedeno za duljine propusta  $L_c = 10 \text{ m}$ ,  $15 \text{ m}$  i  $20 \text{ m}$  u prirodnom mjerilu, odnosno  $1 \text{ m}$ ,  $1,5 \text{ m}$  i  $2 \text{ m}$  u modelskom mjerilu. Izabrana su dva promjera propusta koja u prirodnom mjerilu iznose  $1 \text{ m}$  i  $0,6 \text{ m}$ , odno-

sno 0,1 m i 0,06 m u modelskom mjerilu. Na lice lukobrana ugrađen je kameni nabačaj u mjerilu modela koji simulira školjeru. Mjerenja su izvršena za potpuno uranjanje propusta, kad je razina voda pri vrhu cijevi (razina W1), i djelomičnog uranjanja cijevi, kad je razina vode u visini osi cijevnog propusta (razina W2).



Slika 2. Presjek fizikalnog modela (valnog kanala) Građevinskog fakulteta; prikazane su dvije različite razine vode za koje je izvršeno mjerenje i ADV uređaj

Valovi su se producirali korištenjem valnog generatora tipa "piston" s ugrađenim AWA-CS sustavom (Active Wave Absorption Control System). Pomoću AWACS sustava mogu se izbjeći neželjeni utjecaji refleksije od ploče generatora. Sustav omogućuje slanje spektralnih valova i potpunu kontrolu incidentnih valova, čak i kada se vrše testiranja konstrukcija s visokom refleksijom. Izabrano je devet karakterističnih spektralnih valova koji se mogu naći u morima sličnim Jadranskom u smislu veličine privjetrišta, te jačini i smjeru vjetrova (tablica 1.).

Tablica 1. Parametri valova koji su primijenjeni u laboratorijskom ispitivanju

Spektralni valovi							
Broj testa	Hs [m]	Tp [s]	Hs/Lp [1]	Lp [m]	Lc [m]	Dc [m]	Razina vode
1	0,06	0,83	0,056	1,08	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2
2	0,10	1,07	0,056	1,8	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2
3	0,16	1,36	0,056	2,88	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2
4	0,06	0,98	0,040	1,5	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2
5	0,11	1,33	0,040	2,75	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2
6	0,14	1,50	0,040	3,5	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2
7	0,07	1,21	0,030	2,3	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2
8	0,08	1,30	0,030	2,65	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2
9	0,12	1,59	0,030	3,95	1,0;1,5;2,0	0,1;0,06	W1; W2

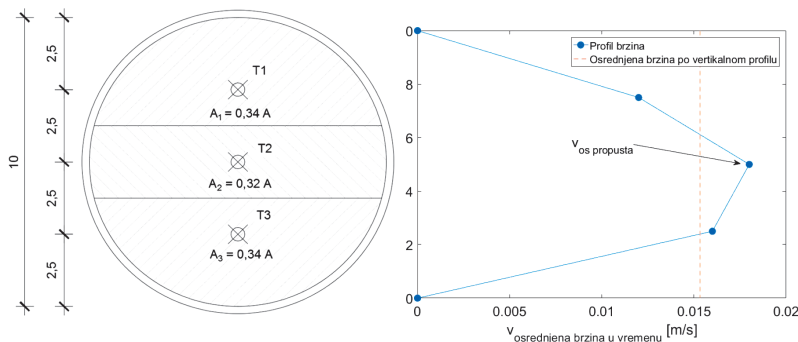
Hs - značajna valna visina; Tp - peak period; Lp - dubokovodna peak valna duljina;  
Lc - duljina cijevnog propusta; Dc - promjer cijevnog propusta; W - uronjenost propusta

Valovi nailaze okomito na konstrukciju lukobrana i u tom procesu propusti omogućuju protok mora kroz tijelo lukobrana i lokalnu penetraciju valne energije, što uzrokuje valovanje u lučkom bazenu. Protok u propustima je posredno mjereno pomoću ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) uređaja postavljenog na izlaz iz cijevnog propusta koji bilježi brzinu vode u propustu [12].

Dobiveni vremenski nizovi brzina mjereni pomoću ADV uređaja bili su podvrgnute filtriranju. Za filtriranje podataka primijenjena je Phase-Space metoda [13] koja otkriva neispravne vrijednosti (tzv. "šiljci") pomoću elipsoida u koordinatnom sustavu osi kojega su definirane brzinom i promjenom brzine u vremenu. Ako je otkriven šiljak, zamjenjuje se novom vrijednošću koja je definirana polinomom 4. stupnja kroz 24 susjedne točke, te se postupak obavlja u više iteracija.

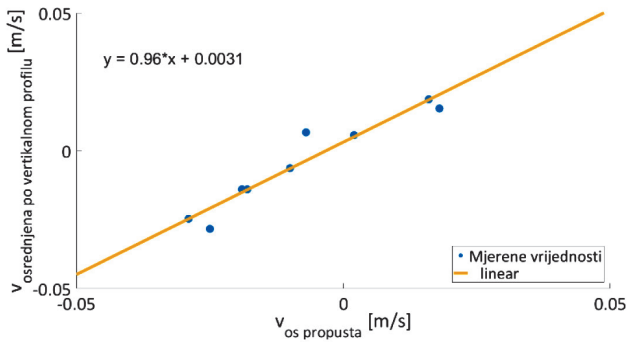
### 3 Rezultati i diskusija

Kod potpuno uronjene cijevi pod djelovanjem valova dolazi do periodičkih oscilacija protoka. Osrednjavanjem brzine u vremenu može se dobiti srednja brzina u nekoj točki protjecajnog presjeka koja nas upućuje na to ulazi li voda ili izlazi iz luke unutar perioda osrednjavanja. Ako nas zanima prostorna promjena brzina u presjeku cijevi, treba uzeti u obzir više točaka mjerenja. Stoga su provedena mjerenja u više točaka vertikalnog profila cijevi radi uvida na moguće značajne promjene brzine i smjera po vertikalnom profilu kao i formiranje protustruje unutar propusta (slika 3.).

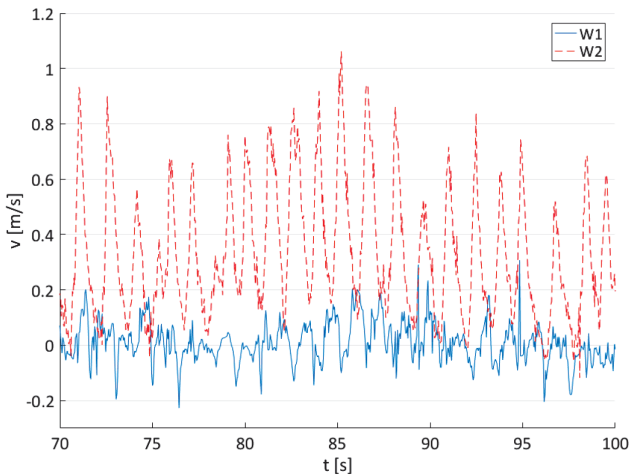


Slika 3. Presjek potpuno uronjenog cijevnog propusta s naznačenim točkama mjerenja (lijevo), profil brzina unutar propusta (desno)

Brzina osrednjena po vertikalnom profilu izračunana je primjenom težinskog prosjeka ponderirajući brzine pripadajućim površinama u kojima se točke mjerenja nalaze. Nadalje, uspoređivan je odnos brzine u osi propusta s brzinom osrednjenom po vertikali za svaki spektralni val (tablica 1.) kako bi se utvrdilo je li je brzina izmjerena u osi reprezentativna za cijeli presjek (slika 4.).



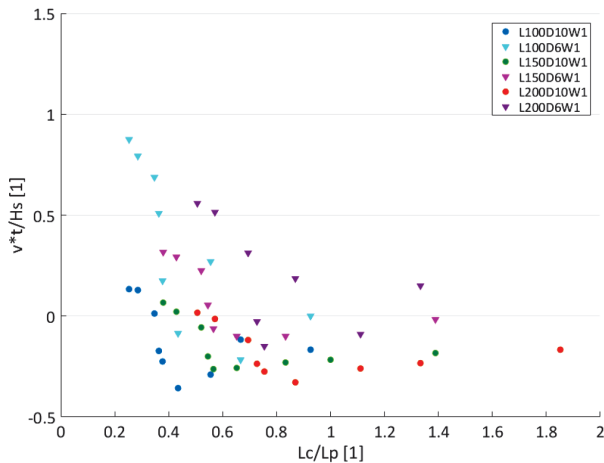
Slika 4. Odnos osrednjene brzine po vertikalnom profilu cijevi i brzine u osi cijevi pri uvjetima potpunog uranjanja propusta



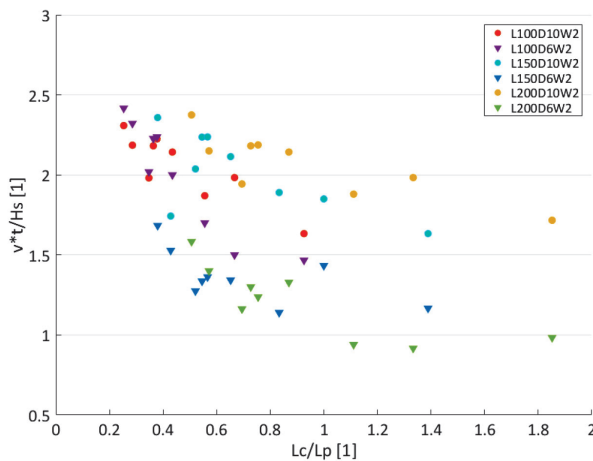
Slika 5. Vremenski niz brzina: razina vode pri vrhu cijevnog propusta (W1) i razina vode na osi cijevnog propusta (W2)

Usporedbom je utvrđeno da se brzina u osi propusta može upotrijebiti kao relevantna vrijednost za prikazivanje ukupnog strujanja unutar propusta. Stoga se nadalje mjeri i prikazuje samo brzina u osi cijevnog propusta. Spektralni valovi (tablica 1.) izazivaju bitno različite brzine u slučaju potpuno uronjenog (W1) i djelomično uronjenog cijevnog propusta (W2) (slika 5.). Pri razini W1 srednja je brzina gotovo jednaka 0 m/s i fluktuirá nepredvidljivo, što upućuje na kolebanje volumena vode uzduž cijevi (lijevo-desno) što rezultira manjim protokom vode kroz cijevni propusta i dovodi do djelomične penetracije valne energije u skladu s prijašnjim istraživanjima [12]. Međutim kada je razine voda na koti W2, srednja brzina ima dominantan smjer prema akvatoriju i brzine osciliraju predvidljivo u skladu sa sinusnom funkcijom amplitude 0,8 m/s. Sinusna funkcija prati brjegové i dolí spektralnog valova koji nailaze na lukobran s ugrađenim cijevnim propustom.





Slika 6. Ovisnost omjera duljine cijevnog propusta i dubokovodne valne duljine prema omjeru srednje brzine i valne visine kada je razina vode pri vrhu cijevnog propusta (razina W1);  $v$  je brzina u osi propusta



Slika 7. Ovisnost omjera duljine cijevnog propusta i dubokovodne valne duljine prema omjeru srednje brzine i valne visine kada je razina vode na osi cijevi (razina W2);  $v$  je brzina u osi propusta

Nadalje, u skladu s prethodno demonstriranim vremenskim nizom (slika 5.), globalno promatrajući vremenski osrednjene brzine višestruko su manje za potpuno uronjeni cijevni propusta za razne geometrijske karakteristike propusta i parametre valova (slika 6.) nego osrednjene brzine u djelomično uronjenom cijevnom propustu (slika 7.), što definira uronjenost kao dominantni čimbenik u određivanju brzine strujanja u propustu. Analizirani rezultati za situaciju potpunog uronjenog propusta (slika 6.) otkrivaju da je u 50 % slučajeva izmjerena negativna brzina, što upućuje na to da voda struji iz akvatorija. Negativne srednje brzine ponajprije se bilježe kod cijevnog propusta s većim

promjerom 0,1 m gotovo u 80 % slučajeva. Fenomen se dešava zbog kolebanja manjeg volumena vode unutar propusta te je izraženiji kod valova kraćih valnih duljina. Iznimke su vidljive pri malom odnosu duljine propusta i dubokovodne valne duljine ( $L_c/L_p$ ) kada je srednja brzina pozitivna vrijednost. Prema rezultatima (slike 6. i 7.) manje vrijednosti omjera duljine cijevnog propusta i dubokovodne valne duljine ( $L_c/L_p$ ) uvijek će rezultirati većim brzinama za proizvoljnu valnu visinu.

Pri djelomično uronjenom propustu srednje su brzine za propuste manjeg promjera 0,06 m osjetljivije na djelovanje omjera  $L_c/L_p$  nego srednja brzina kod većeg promjera 0,1 m. Za vrijednost omjera  $L_c/L_p$  koja iznosi 1 brzina će biti 35 % veća u propustu promjera 0,1 m nego u propustu promjera 0,06 m za neku proizvoljnu valnu visinu. Dobivene su brzine manje za cijev manjeg promjera pod istim uvjetima zbog većega utjecaja trenja u manjoj cijevi.

Neočekivano je da se teorijski model koji je izrađen na osnovi mjerenja provedenih na potpuno uronjenim propustima (slika 1.) ne slaže s rezultatima ovog ispitivanja u istim uvjetima (slika 6.), iako se slažu s uvjetima djelomično uronjene cijevi (slika 7.) za koju se ovisnost varijabli može opisati eksponencijalnom funkcijom. Razlog neslaganju leži u korištenju monokromatskih valova koji ne oslikavaju realno valnu sliku u prirodi i malom mjerilu fizikalnog modela ( $\lambda = 25$  do  $\lambda = 30$ ) u prethodnim istraživanjima, što uključuje značajan utjecaj kapilarnih sila unutar cijevi modela koje su promjera 2 do 3 cm. Nadalje, tijekom izrade teorijskog modela pretpostavljena je hidrostatska raspodjela tlakova ispod gravitacijskog vjetrovnog vala, što ne oslikava realno stanje u dubokom i prijelaznom području. Valja primijetiti da teorijski model daje pregled rezultata samo za vrijednost omjera  $L_c/L_p < 0,4$ ; u navedenom je području riječ o dugačkim valovima koji su rijetki na Jadranu.

## 4 Zaključak

Narušena kvaliteta vode jedan je od bitnih problema koji postoje u akvatoriju marina i luka. Cijevni propusti se često rabe kao rješenje problema, ali inženjeri primjenjuju propuste iskustveno, jer njihovo funkcioniranje nije dovoljno istraženo. U ovom se radu istraživala izmjena vode na modelu velikog mjerila ( $\lambda = 10$ ) mjereći brzine u cijevnom propustu, te su upotrijebljeni spektralni valovi koji su prikladni za opis valne klime u prirodi. Proveden je velik broj mjerenja kako bi se dobio bolji uvid u hidrodinamičko funkcioniranje cijevnog propusta.

Otkriveno je da su srednje brzine za potpuno uronjeni cijevni propust 3 (za veće valne duljine;  $L_c/L_p < 0,4$ ) do 10 (za manje valne duljine;  $L_c/L_p > 0,8$ ) puta manje nego pri djelomično uronjenim cijevnim propustima. Također je uočeno da sve manje vrijednosti odnosa duljine cijevnog propusta i dubokovodne valne duljine daju sve veće brzine. Stoga se preporučuju kraći cijevni propusti visinski smješteni na srednju razinu mora za što učinkovitiju izmjenu vode. Veći promjeri propusta za djelomično uronjeni propust daju veće brzine za kraće valove nego manji promjeri, dok je kod potpuno uronjenog propusta obrnuta situacija. Uronjenost se može uzeti kao dominantan čimbenik u definiranju brzine strujanja u propustu.

Ne bi trebalo zanemariti negativan utjecaj prevelike transmisije valne energije u akvatorij marine. Zato bi trebalo budućim istraživanjima postaviti relacije kojima će se moći jednostavno odrediti koeficijenti transmisije i protoka vode kroz propust radi optimalnoga projektiranja. Također treba istražiti potencijalnu opasnost previsokih maksimalnih brzina kroz propust koje mogu negativno djelovati na infrastrukturu marine.

Prikazano je istraživanje financirala Hrvatska zaklada za znanost u okviru projekta EKOMARINA (UIP-09-2014).

## Literatura

- [1] Yin, J., Falconer, R. A., Pipilis, K., Stamou, A. I.: Flow Characteristics and Flushing Processes in Marinas and Costal Embayments, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Int Conf on Maritime Engineering and Ports, Genoa, pp. 88-98, 1998.
- [2] Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., Brooks, N. H.: Mixing in Inland and Coastal Waters, *Academic Press*, (1979), pp. 483-493.
- [3] Schwartz, R.A.: The flushing characteristics of Hillarys boat harbor, Australia, University of Western Australia, 1989.
- [4] US Army Corps of Engineers: Coastal Engineering Manual (CEM), USACE Publications, 2002.
- [5] Nece, R. A.: Planform effects on tidal flushing of marinas, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 110 (1984) 2, pp. 251-269.
- [6] Falconer, R. A., Gouping, Y.: Effects of depth, bed slope and scaling on tidal currents and exchange in a laboratory model harbor, *Proc Institution civil engineers*, 91 (1991) 2, pp. 561-76.
- [7] Ozhan, E., Tore, E.: Studies for improving flushing ability of Marmaris marina, *Comp Mech Publication*, (1992), pp. 267.
- [8] de Kreeke, J.: Residence Time: Application to Small Boat Basins, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 109 (1983) 4, pp. 416-28.
- [9] Tsoukala, V. K., Moutzouris, C. I.: Wave transmission in harbors through flushing culverts, *Ocean Engineering*, 36 (2009) 6-7, pp. 434-45.
- [10] Bruun, P. M., Viggosson, G.: The wave pump: conversion of wave energy to current energy, *Journal of the Water, Port, Coastal and Ocean Division*, 103 (1977) 4, pp. 449-469.
- [11] Balas, L., Inan, A.: Modeling of Induced Circulation, *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, 5 (2010) 3, pp. 132-43.
- [12] Stagonas, D., Gerald, M., Magagna, D., Warbrick, D.: Fundamental investigation of water flow in harbors through a flushing culvert, IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environments, 2009.
- [13] Goring, D. G., Nikora, V. I.: Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (2002) 1, pp. 117-126.

# Ovisnost funkcija hidroenergetskog sustava o indikatorima klimatskih promjena

Željko Pavlin<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Neven Kuspilić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Elektroprojekt d.d., [zeljko.pavlin@elektroprojekt.hr](mailto:zeljko.pavlin@elektroprojekt.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, [kuspa@grad.hr](mailto:kuspa@grad.hr)

## Sažetak

Klimatske promjene mogu utjecati na postojeće hidroenergetske sustave (eng. *existing hydropower systems* - HES) te se javlja potreba za prilagodbom njihovih elemenata i/ili upravljanja radi održanja sigurnosti i postizanja željenih učinaka. Radi pravovremenoga poduzimanja mjera prilagodbe treba ustanoviti osjetljivost sustava. Dan je pregled mogućih indikatora klimatskih promjena koji se mogu dovesti u vezu s funkcionalnim zahtjevima HES. Na temelju rezultata provedenoga istraživanja, na primjeru postojećeg HES na Lici i Gackoj, dani su zaključci i prijedlozi za daljnji rad na razvoju metodologije osjetljivosti HES na klimatske promjene.

*Ključne riječi: klimatske promjene, indikatori, hidroenergetski sustav, osjetljivost, prilagodba*

## Dependence of hydropower system functions on climate change indicators

### Abstract

Climate changes may affect the existing hydropower systems (HES) and so it is necessary to adapt their elements and/or management to ensure safe functioning and achieve desired effects. The sensitivity of the system must be established so that timely adjustment measures can be taken. An overview of possible climate change indicators, which could be correlated with functional requirements of HES, is given. Based on analysis results, conclusions and recommendations for future work on the development of the methodology for determination of HES sensitivity to climate change are given, using as an example the existing HES on the Lika and Gacka rivers.

*Key words: climate changes, indicators, hydropower system, sensitivity, adjustment*

## 1 Uvod

U zadnje vrijeme često dolazi do raznih neplaniranih i neželjenih događaja čiji se uzroci pripisuju klimatskim promjenama i/ili varijacijama klime (CC/CV). Ovi događaji vezani su uz pojave nepredviđenih hidroloških događaja kojima su izloženi pojedini oblici ljudske djelatnosti. Hidroenergetika predstavlja jedan od oblika korištenja voda, a funkcionalnost i sigurnost hidroenergetskih sustava vezana je uz hidrološke pojave koje se nalaze pod utjecajem CC/CV.

Postojeći hidroenergetski sustavi (HES) osim svoje osnovne namjene, proizvodnje električne energije, trebaju zadovoljiti i druge namjene kao što su zaštita od poplava, osiguranje i zahvat vode za piće i navodnjavanje. Također, HES predstavlja dio okoliša u kojem se nalazi te treba zadovoljavati i uvjete i mjere koji proizlaze iz zahtjeva zaštite okoliša, poput ekološki prihvatljivoga protoka nizvodno od mjesta zahvata. Varijacije hidroloških parametara osim na proizvodnju električne energije kao osnovne namjene HES-a utječu i na ostale namjene koje sustav treba zadovoljiti. Općenito, promjene opterećenja, u ovom slučaju hidroloških ulaza, utječu na:

- konstrukcijske zahtjeve (temeljni zahtjevi),
- funkcionalne zahtjeve (zadovoljenje namjena).

Do sada nisu sustavno provedene sveobuhvatne analize posljedica koje bi CC/CV mogle imati na HES. Provedene analize isključivo su vezane za analizu utjecaja na proizvodnju električne energije. Budući da CC/CV mogu utjecati na postojeće HES, javlja se potreba za prilagodbom njihovih elemenata i/ili upravljanja radi održanja sigurnosti sustava i postizanja željenih efekata u budućem stanju kod promjene klime. Pretpostavlja se da je za postojeći HES moguće odrediti, izvan projektne vrijednosti, graničnu vrijednost protoka pri kojoj još nije ugrožena njegova funkcionalnost. Da bi se mogle pravovremeno poduzeti mjere prilagodbe HES-a na CC/CV, treba postaviti metodologiju na osnovi koje bi se ustanovila njegova osjetljivost na promjene.

## 2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Osjetljivost sustava na hidrološku nepouzdanost uvjetovanu CC/CV predstavlja rezultat nepouzdanosti uvjetovane promjenama vanjskog djelovanja i ograničenja vezanih uz projektiranu konstrukciju sustava kao i mogućnosti i ograničenja u upravljanju sustavom. U nastavku se daje sažeti prikaz dosadašnjih istraživanja i radova u kojima su analizirani utjecaji CC/CV na konstrukcijsku i funkcionalnu osjetljivost HES-a.

**Konstrukcijska osjetljivost (temeljni zahtjevi)** - Analiza pouzdanosti konstrukcije sustava koja se sada primjenjuje ne razmatra vremensku promjenljivost opterećenja, već promatra najnepovoljnije opterećenje. Veličina najnepovoljnijega opterećenja obično je vezana za vjerojatnost pojave koja se temelji na promatranju prošlosti. Pouzdanost

konstrukcije, prema tome, vezana je uz vjerojatnost pojave opterećenja u budućnosti u uvjetima kakvi su bili i u prošlosti. S obzirom na dugotrajni životni vijek HES-a, CC/CV utječe na promjenu uvjeta koji formiraju opterećenja u budućnosti u odnosu na uvjete kakvi su do početka korištenja sustava bili i na koje su elementi sustava projektirani. Stoga se javlja potreba za uvođenjem novoga pristupa kod kontrole pouzdanosti konstrukcije i potreba njezina preispitivanja u novim uvjetima tijekom razdoblja korištenja [1], [2].

Funkcionalna osjetljivost (zadovoljenje namjena) - Postoji dosta istraživanja i radova posvećenih upravljanju vodnogospodarskim sustavima, u koje spadaju i HES, usmjerenih na istraživanje funkcionalnosti sustava [3-5]. Uočavanjem CC/CV počela se posebna pažnja posvećivati načinu i pristupu donošenja odluka i upravljanju zbog prilagodbe novonastalim uvjetima [4]. U pristupu upravljanju počele su se razlikovati odluke i upravljanje koje proizlazi iz potrebe prilagodbe CC/CV i odluke koje nisu vezane za prilagodbu CC/CV.

Kako bi se ispunjavanje funkcija HES-a, odnosno moguće upravljačke varijante mogle međusobno usporediti, treba provesti njihovu ocjenu odnosno valorizaciju efekata. U velikom broju zemalja s razvijenim tržišnim gospodarstvom uobičajena je uporaba ekonomskih metoda kod donošenja odluka o ulasku u složene infrastrukturne zahvate, ali i kod razmatranja strateških planova i načina upravljanja resursima. Osnovne su grupe metoda kojima se učinci sustava ekonomski vrednuju metode tržišnog pristupa, metode zamjenskog tržišta i metode koje simuliraju tržište [6].

Osjetljivost sustava na CC/CV očituje se kroz vrednovanje učinaka koje bi klimatske promjene prouzrokovale u njegovom funkcioniranju i pouzdanosti konstrukcije. Analiza utjecaja CC/CV na HES trebala bi povezati osjetljivost sustava na CC/CV s parametrima HES-a i parametrima sredine u kojoj se sustav nalazi. Time bi ocjenom osjetljivosti HES na CC/CV bilo moguće pravovremeno poduzeti potrebne mjere kako bi se povećala robusnost sustava. Robusnost sustava, pri tome, predstavlja stupanj njegove sposobnosti da se odupre očekivanim i neočekivanim promjenama, a ujedno predstavlja i mjeru pouzdanosti u pogledu redovnog rada.

### **3 Analiza ovisnosti funkcija sustava i indikatora hidroloških promjena**

Budući da CC/CV utječu na varijacije hidroloških parametara koji utječu na konstrukciju i funkcionalne zahtjeve HES-a, razmatrani su Indikatori hidroloških promjena (IHA) za koje se smatra da vrlo dobro opisuju karakteristike hidrološkog režima. IHA predstavljaju skoro sve važnije komponente hidrološkoga režima, nose većinu informacija i jednostavni su za proračun. U tablici 1. daje se pregled indikatora koji su uobičajeni u hidrološkim analizama, te se neće detaljnije obrazlagati. Dodatno se mogu razmatrati i grupe indikatora vezane za učestalost i trajanje visokih i niskih pulseva, te brzinu i čestinu promjene stanja [7].

Za vodotok na kojem se nalazi HES analiziraju se IHA. Analizom IHA na osnovi podataka mjerenja može se utvrditi je li, u razdoblju u kojem je mjerenje provedeno, došlo do promjena i kakve su.

Tablica 1. Indikatori hidroloških promjena (IHA)

INDIKATORI HIDROLOŠKIH PROMJENA [8]		
GRUPA INDIKATORA HIDROLOŠKIH PROMJENA	KARAKTERISTIKA REŽIMA	PARAMETAR
mjesečne hidrološke veličine	vremenski raspored veličina	1.0 srednji godišnji protok*
		1.1 srednji mjesečni protok, siječanj
		1.2 srednji mjesečni protok, veljača
		1.3 srednji mjesečni protok, ožujak
		1.4 srednji mjesečni protok, travanj
		1.5 srednji mjesečni protok, svibanj
		1.6 srednji mjesečni protok, lipanj
		1.7 srednji mjesečni protok, srpanj
		1.8 srednji mjesečni protok, kolovoz
		1.9 srednji mjesečni protok, rujanj
		1.10 srednji mjesečni protok, listopad
		1.11 srednji mjesečni protok, studeni
1.12 srednji mjesečni protok, prosinac		
veličina i trajanje godišnjih ekstrema	trajanje veličina	2.1 srednji protok malovodnog perioda trajanja 1 dan
		2.2 srednji protok velikovodnog perioda trajanja 1 dan
		2.3 srednji protok malovodnog perioda trajanja 3 dana
		2.4 srednji protok velikovodnog perioda trajanja 3 dana
		2.5 srednji protok malovodnog perioda trajanja 7 dana
		2.6 srednji protok velikovodnog perioda trajanja 7 dana
		2.7 srednji protok malovodnog perioda trajanja 30 dana
		2.8 srednji protok velikovodnog perioda trajanja 30 dana
		2.9 srednji protok malovodnog perioda trajanja 90 dana
		2.10 srednji protok velikovodnog perioda trajanja 90 dana
vremenski raspored ekstrema	vremenski raspored	3.1 datum godišnjeg maksimuma
		3.2 datum godišnjeg minimuma
* U originalnoj se metodi srednji godišnji protok ne ubraja u indikatore hidroloških promjena, ali se ovdje uvrštava kao jedan od uobičajenih hidroloških pokazatelja		

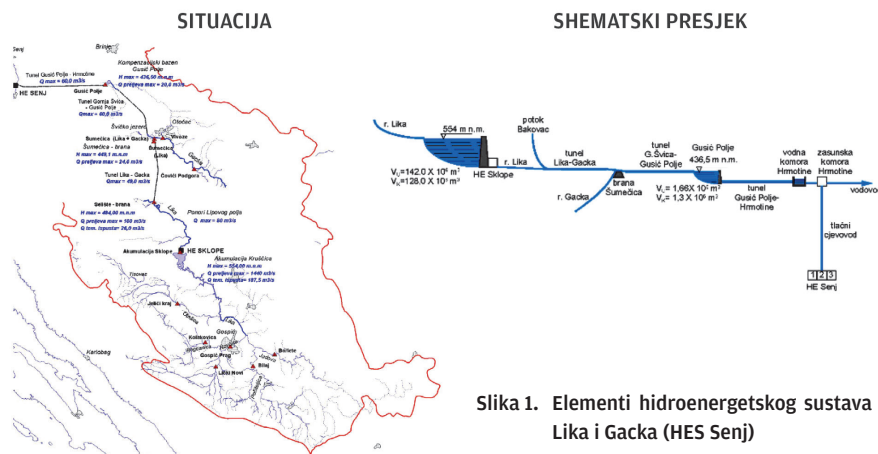
U prvom koraku dovode se u vezu klimatski indikatori i pojedine funkcije sustava. Možeće veze su:

- za funkciju proizvodnje električne energije - povezivanje indikatora s proizvodnjom električne energije
- za funkciju obrane od poplave - povezivanje indikatora s brojem dana pojava poplave
- za funkciju opskrbe vodom - povezivanje indikatora s mogućnosti neprekidnog rada vodoopskrbnog sustava
- za funkciju navodnjavanja - povezivanje indikatora s mogućnosti zadovoljenja potreba za vodom za navodnjavanje
- za ispunjavanje zahtjeva u okolišu - povezivanje indikatora s mogućnosti zadovoljenja ekološki prihvatljivog protoka ili s brojem sušnih dana.

Razmatranjem povijesnih podataka može se dobiti uvid u to postoji li i kakva je kvaliteta i jačina funkcijske veze pojedinog IHA i pojedine funkcije HES-a. Također se može dobiti uvid postoje li, u dosadašnjem radu sustava, uvjeti koji se mogu iskazati veličinom IHA kod kojih se određene funkcije sustava ne ispunjavaju. Izradom modela sustava, koji se kalibrira na mjerenim podacima, a na kojem će biti moguća simulacija za bilo koje buduće hipotetsko stanje, variranjem indikatora planira se definirati niz ulaznih podataka te na temelju simulacije na modelu odrediti utjecaje koje bi simulirane promjene mogle prouzročiti u radu HES-a. Odnosno, ovakvim bi se pristupom odredila stanja te vrsta i veličina indikatora, kod kojih bi došlo do kritičnog stanja pojedine funkcije HES-a. Time bi se postavila osnova za izradu metodologije ispitivanja osjetljivosti HES-a na CC/CV.

## 4 Primjer hidroenergetskog sustava na slivovima Like i Gacke

Za provođenje analize povezanosti IHA i funkcija HES-a odabran je HES kojim se vode Like i Gacke rabe za potrebe energetike, vodoopskrbe i zaštite od poplava (slika 1).



Slika 1. Elementi hidroenergetskog sustava Like i Gacke (HES Senj)



Sustav se nalazi u okruženju koji je specifičan zbog zaštite okoliša, zbog čega se na njegov rad postavljaju posebni zahtjevi. Posebnost se također očituje u korištenju dviju rijeka od kojih je jedna, Lika, bujičnog karaktera, dok druga, Gacka, ima izravnani režim tečenja.

HES rijeka Like i Gacke (za koji se često rabi i naziv HES Senj) nalazi se u središnjem dijelu Republike Hrvatske, u Ličko-senjskoj županiji. Objekti ovog HES-a locirani su od Gospića na jugoistoku do Senja na sjeverozapadu i protežu se na linijskoj zračnoj udaljenosti od oko 60 km. U današnjem stanju izgrađenosti, koji potječe iz šezdesetih godina 20. stoljeća, voda se hidroenergetski iskorištava na dvije hidroelektrane (HE): pribranskoj HE Sklope (instaliranoga protoka 45 m<sup>3</sup>/s), i derivacijskoj HE Senj (instaliranoga protoka 60 m<sup>3</sup>/s), na ukupnom bruto padu od oko 550 m ostvarenom od uspora Kruščica do Jadranskog mora.

Pri realizaciji HES-a rijeka Like i Gacke izvršeno je prevođenje, sustavom kanala, tunela i pripadnih hidrotehničkih objekata, dijela voda uzvodnijeg sliva Like prema vodama rijeke Gacke, gdje se one spajaju u čvoru Šumečica i dalje se derivacijskim sustavom (dva kanala i jedan tunel) dovode do kompenzacijskog bazena u Gusić polju. Nakon hidroenergetskog iskorištenja djelomično izravnanih voda Like akumulacijom Kruščica na HE Sklope, i to na bruto padu od oko 70 m, dio zahvaćenih i prerađenih voda rijeke Like prevodi se prema koritu rijeke Gacke, pa se one zajednički iskorištavaju na padu od Gusić polja do Jadranskog mora (oko 437 m) na najznačajnijem objektu u sustavu - hidroelektrani (HE) Senj.

Koncepcija korištenja voda slivova Like i Gacke počiva na činjenici da su vode Like čeonom akumulacijom Kruščica djelomično izravnane, dok izravnanje dotoka Gacke i sliva Selište nije moguće realizirati akumulacijskim prostorom, pošto topografski (Gacka) i hidrogeološki (Bakovac) uvjeti ne dopuštaju izgradnju akumulacija na ovim vodotocima. Ovo znači da se prioritetno na HE Senj rabe vode rijeke Gacke na dnevnoj razini, a nadopunjuju se dotocima sliva rijeke Like ispuštanjem iz akumulacije Kruščica.

Da bi sustav mogao biti analiziran, prikupljeni su podaci o njegovim elementima i načinu kako se njime upravlja u postojećim uvjetima. Na osnovi prikupljenih podloga analizirane su funkcije u uvjetima raznih hidroloških stanja iz razdoblja 1971.-2014.

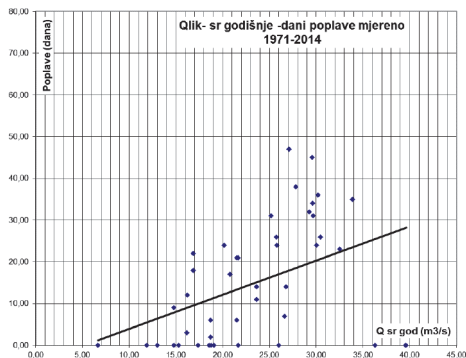
Obveze Hrvatske elektroprivrede, kao vlasnika vodnih građevina prema drugim korisnicima voda, i način rada u ekstremnim hidrološkim situacijama definirane su *Pravilnikom za upravljanje hidroenergetskim sustavom HE Senj*, koji osim prostornih, ekoloških i hidrometeoroloških uvjeta uvažava obveze definirane u okviru vodopravnih dozvola i koncesijskih ugovora, te zahtjeve i potrebe ostalih korisnika voda na slivu.

Za HES Like i Gacke (HES Senj), za njegov dio koji je vezan za upravljanje i korištenje vodama Like, odnosno za akumulaciju Kosinj i HE Sklope izrađeni su klimatski indikatori i napravljena je linearna regresija s dvije osnovne funkcije ovoga dijela sustava, a to su proizvodnja električne energije i obrana od poplave područja Lipovog polja. Od klimatskih indikatora za inicijalno razmatranje uzeti su samo godišnje i mjesečne hidrološke veličine.

Za razmatrani segment HES-a, vezan isključivo uz korištenje rijeke Like, i navedene dvije osnovne funkcije u nastavku se daje grafički prikaz povezanosti:

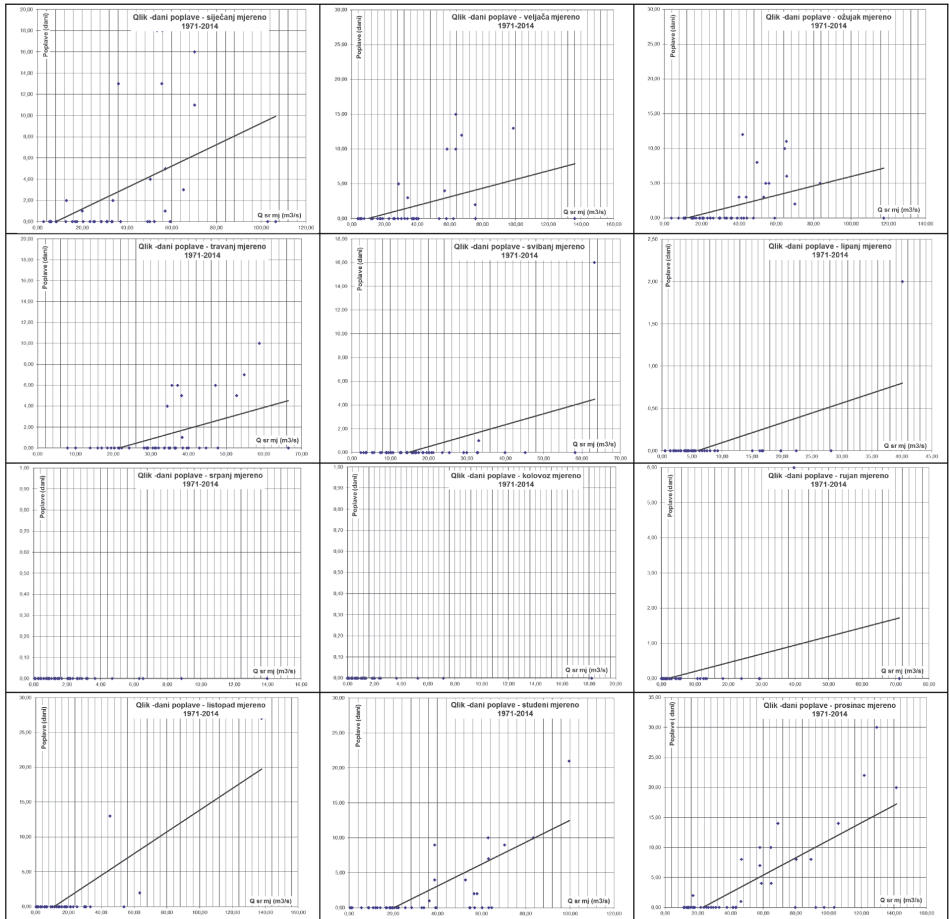
- za obranu od poplava klimatskih indikatora i dana trajanja poplava,
- za proizvodnju energije klimatskih indikatora i proizvodnje energije.

Na osnovi provedenih analiza vidljivo je da postoji veza klimatskih indikatora i proizvodnje električne energije i obrane od poplava nizvodnog područja. Za obranu od poplava vidljivo je da u razdoblju razmatranja od 1971.-2014., kod postojećega stanja sustava i postojećeg načina upravljanja sustavom, sustav ne zadovoljava u svim slučajevima. Može se uspostaviti ovisnost između indikatora klimatskih promjena i pojave poplave, odnosno broja dana poplava (slike 2. i 3.). Razmatrana ovisnost, za povijesne podatke, pokazuje da postoji granica veličine indikatora klimatskih promjena kod koje dolazi do neispunjavanja ove funkcije sustava.

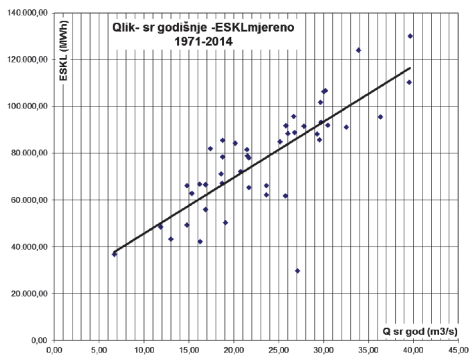


Slika 2. Povezanost broja dana poplave u godini u Lipovom polju i srednjega godišnjeg protoka za razdoblje 1971.-2014.

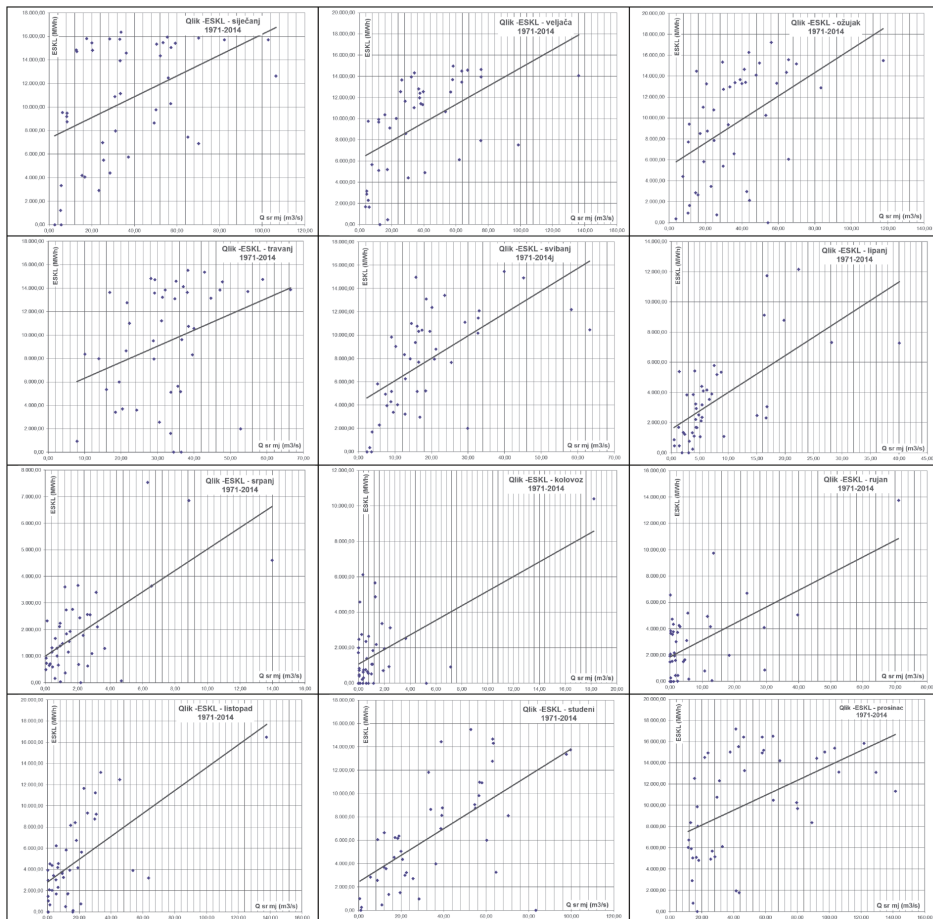
Za proizvodnju električne energije također je moguće uspostaviti ovisnost između indikatora klimatskih promjena i proizvodnje električne energije (slike 4. i 5.). Razmatrana ovisnost, za povijesne podatke ne pokazuje na granicu kod koje bi došlo do potpunoga neispunjavanja ove funkcije, ali pokazuje da postoji utjecaj klimatskih indikatora na veličinu proizvodnje.



Slika 3. Povezanost broja dana poplave u mjesecu u Lipovom polju i srednjega mjesečnog protoka za razdoblje 1971.-2014.



Slika 4. Povezanost godišnje proizvodnje električne energije HE Sklope i srednjega godišnjeg protoka za razdoblje 1971.-2014.



Slika 5. Povezanost mjesečne proizvodnje električne energije HE Sklope i srednjega mjesečnog protoka za razdoblje 1971.-2014.

## 5 Rasprava i prijedlozi za daljnji rad

Na osnovi provedenih analiza na povijesnim podacima utvrđeno je da se može uspostaviti povezanost indikatora klimatskih promjena s ispunjavanjem funkcionalnih zahtjeva hidroenergetskog sustava.

U daljnjem radu na postavi metodologije treba odrediti i druge klimatske indikatore i povezati ih s ispunjavanjem funkcionalnih zahtjeva hidroenergetskog sustava te ustanoviti jačinu njihove povezanosti. Također, treba izraditi matematički model cijelog hidroenergetskog sustava koji treba kalibrirati na povijesne podatke.

Na modelu hidroenergetskog sustava bit će moguće simulirati za proizvoljne promjene klimatskih indikatora utjecaj na funkcije hidroenergetskog sustava. Budući da postoje i utjecaji stanja iz prethodnih godina na analiziranu izmijenjenu godinu, razmatra se za analize uzeti razdoblje od dvije prosječne godine nakon koje se javlja izmijenjena godina. Takav pristup bi bio osnova za provođenje daljnjih analiza.

Ispitivanjem na uspostavljenom modelu mogla bi se utvrditi, za svaku od funkcija, granica promjena kod koje hidroenergetski sustav još ispunjava tu funkciju. Za takva granična stanja pojedine funkcije ustanovio bi se stupanj zadovoljenja i ostalih funkcija. Rezultati takve analize bili bi ulazni podaci za valorizaciju ispunjenja funkcija hidroenergetskog sustava pri određenom graničnom stanju klimatskih pokazatelja.

## 6 Zaključak

Provedene analize pokazuju da bi za postojeće hidroenergetske sustave bilo moguće odrediti, izvan projektnih vrijednosti, graničnu vrijednost protoka pri kojoj još nije ugrožena njegova funkcionalnost. Na temelju daljnjih razmatranja i analiza treba:

- iznaći, definirati i odabrati mjerodavne indikatore za analizu i kategorizaciju osjetljivosti hidroenergetskog sustava na klimatske promjene i/ili varijacije klime i
- postaviti metodologiju ocjene osjetljivosti hidroenergetskog sustava.

Na osnovi tako postavljene metodologije moguće je postojeće i novo planirane hidroenergetske sustave analizirati i kategorizirati prema osjetljivosti na klimatske promjene. Time je moguće pravovremeno predvidjeti utjecaje klimatskih promjena i/ili varijacije klime i poduzeti mjere potrebne za smanjenje utjecaja klimatskih promjena, odnosno za povećanje robusnosti sustava.

## Literatura

- [1] Pickles, A., Sandham, S., Simpson, B., Bond, A.: *Application of Eurocode 7 to the design of flood embankments*, CIRIA, London, 2014.
- [2] Srzić, V.: Analize pouzdanosti hidrotehničkih sustava - predavanja, Split: GF Split.
- [3] Đorđević, B.: *Vodoprivredni sistemi*, Naučna knjiga, Građevinski fakultet Beograd, Beograd, 1990.
- [4] Willows, R.I., Connell, R.K.: *Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision making*, UK-CIP, Oxford, 2003.
- [5] Muæoz, J.R., Sailor, D.J.: A modelling methodology for assessing the impact of climate variability and climatic change on hydroelectric generation, *Energy Conversion and Management*, 39 (1998) 14, pp. 1459-1469.

- [6] Commonwealth Department of the Environment, Sport and Territories, the Commonwealth Department of Finance and the Resource Assessment Commission: *Techniques to Value Environmental Resources: An Introductory Handbook*, Australian Government Publishing Service, 1995.
- [7] Barbalić, D., Kuspilić, N.: Trendovi indikatora hidroloških promjena, *Građevinar*, 66 (2014) 7, pp. 613-624
- [8] Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J., Braun, P.: A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems, *Conservation Biology*, Volume 10, No 4, 1996.



# Numerička analiza cirkulacije vode u marini s cijevnim propustima u tijelu lukobrana

Ivana Bartolić<sup>1</sup>, izv.prof.dr.sc. Goran Lončar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, [ibartolic@tvz.hr](mailto:ibartolic@tvz.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, [gloncar@grad.hr](mailto:gloncar@grad.hr)

## Sažetak

Pozicioniranje propusta u tijelu lukobrana jednostavan je način poboljšanja izmjene mora u akvatoriju marine. Utjecaj temperature i saliniteta mora na polje brzina strujanja u akvatoriju marine dobiven je numeričkim simulacijama temeljenima na metodi konačnih diferencija i konačnih volumena. Utjecaj pozicije cijevnih propusta kvantificiran je primjenom e-flushing vremena. Dobiiveni rezultati daju usporedbu dviju numeričkih metoda te smjernice za odabir povoljnije pozicije propusta za izmjenu mora.

*Ključne riječi: numerička analiza, marina, cijevni propusti, e-flushing vrijeme*

## Numerical analysis of water circulation in marinas with flushing culverts in breakwaters

### Abstract

The placement of flushing culverts in breakwaters is a simple way to counteract a decline in water quality in harbour basins. The influence of sea temperature and salinity on the field of current velocity in the marina basin was determined by numerical simulations based on the finite difference and finite volume method. The impact of position of flushing culverts was quantified using the e-flushing time parameter. The results obtained enable comparison of two numerical methods and provide guidelines for better positioning of flushing culverts.

*Key words: numerical analysis, marina, flushing culverts, e-flushing time*

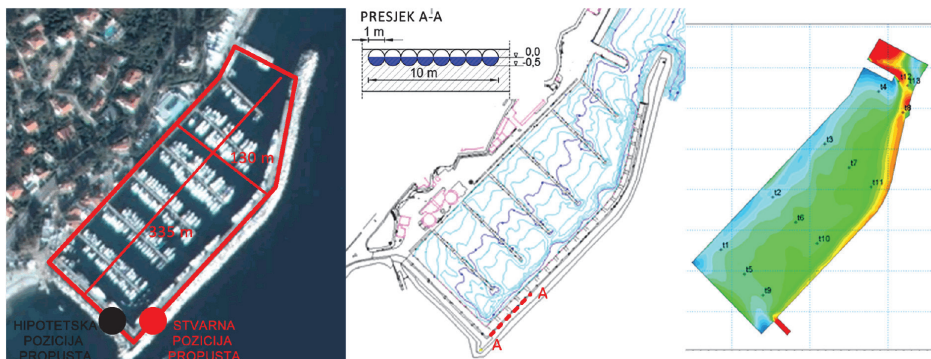


## 1 Uvod

Hrvatska obala svojom razvedenošću i blagom valnom klimom pogodna je za razvoj nautičkoga turizma. Nautički turizam podrazumijeva izgradnju marina za boravak, odmor i rekreaciju nautičara. Za ostvarivanje funkcionalnosti marina izvode se pomorske građevine da se smanji intenzitet valovanja. Takvim zahvatom smanjuje se cirkulacija vode između marine i okolnog akvatorija te se narušavaju prirodni uvjeti okoliša. Kako bi se spriječila stagnacija i poboljšala cirkulacija vode u poluzatvorenom akvatoriju, ekonomski povoljno rješenje je ugradnja cijevnih propusta u tijelo lukobrana. Cijevni propusti poboljšavaju cirkulaciju vode unutar marine i smanjuju područja stagnacije. Izmjena vode između marine i okolnog akvatorija uvjetovana je prirodnim procesima poput djelovanja vjetra, plimnih oscilacija, vjetrovnih valova te razlika u gustoći mora [1-4]. U područjima velikih plimnih oscilacija dominantan utjecaj na cirkulaciju vode u marinama ima izmjena plime i oseke, dok je u područjima malih plimnih oscilacija dominantan vjetar. Primjena propusta opravdana je u područjima s malim plimnim oscilacijama kao što su Jadransko i Egejsko more te većina istraživanja vezana uz cijevne propuste dolazi upravo iz zemalja poput Grčke i Turske.

Doprinos propusta u izmjeni vode može se kvantificirati primjenom tzv. hidrodinamičkih vremenskih parametara. Jedan je od tih parametara "e-flushing", odnosno vrijeme potrebno da se traserska otopina, inicijalno postavljena na 100 % na cijeloj domeni, smanji na faktor  $1/e$  (gdje je "e" baza prirodnog logaritma). To je parametar koji se odnosi na kontrolni volumen i ne uzima u obzir vremensku i prostornu varijabilnost [5]. Rezultat provedenih analiza interpretira se s vremenskim nizovima srednjih koncentracija traserske otopine u šticeu akvatoriju marine. Detaljniji opis navedenoga pristupa dan je u radu [6].

U ovom radu prikazana je numerička analiza utjecaja cijevnih propusta na cirkulaciju vode u marini lčići primjenom metoda konačnih volumena i konačnih diferencija. Analizirane su tri situacije. Prva je hipotetska i predstavlja odsustvo cijevnih propusta. Drugom situacijom modelirano je "postojeće" stanje s 8 cijevi promjera 1 m položenih u tijelu glavnog lukobrana (slika 1.). Treća je situacija također hipotetska, a pretpostavlja poziciju cijevnih propusta na poziciji naznačenoj na slici 1. U modelu su cijevni propusti kružnog presjeka (8 cijevi  $\cdot$  0,39 m<sup>2</sup> pri mirnoj razini = 3,14 m<sup>2</sup>) definirani pravokutnim profilom s presjekom širine 6,28 m i donjom kotom položenom na dubini 0,5 m (ekvivalentna površina 3,14 m<sup>2</sup> pri mirnoj razini).

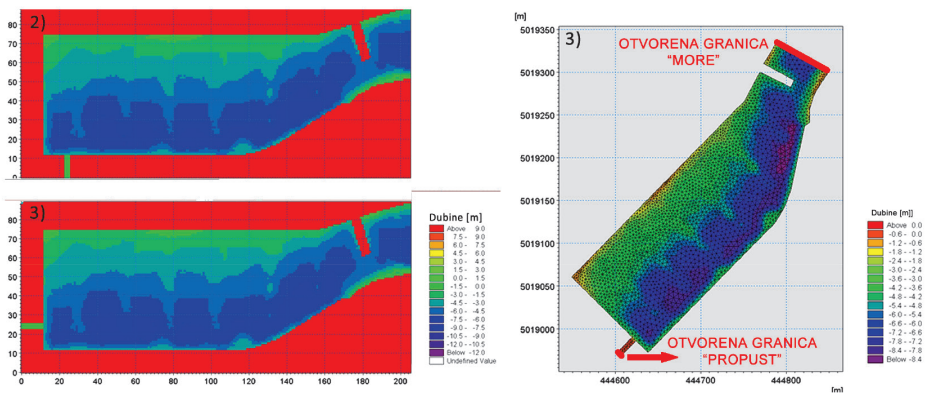


Slika 1. Akvatorij marine Ičići s dimenzijama i naznačenom stvarnom i hipotetskom pozicijom propusta (lijevo); batimetrija marine Ičići s prikazom presjeka kroz propuste (sredina); položaji karakterističnih točaka za analizu strujanja (desno)

Rezultat je provedenih simulacija polje strujanja u akvatoriju marine Ičići dobiveno metodama konačnih diferencija i konačnih volumena. Uspoređene su brzine strujanja u karakterističnim točkama u marini (slika 1. desno), s promjenom gustoće i bez nje, te su dani komparativni vremenski nizovi srednjih koncentracija traserske otopine za spomenuta tri slučaja. Dobiveni rezultati mogu pomoći pri odabiru metode za daljnje numeričke simulacije te određivanju povoljnije pozicije propusta, u obliku učinkovitije izmjene vode, u marinama sličnih geometrijskih i hidrografskih karakteristika.

## 2 Numerički model

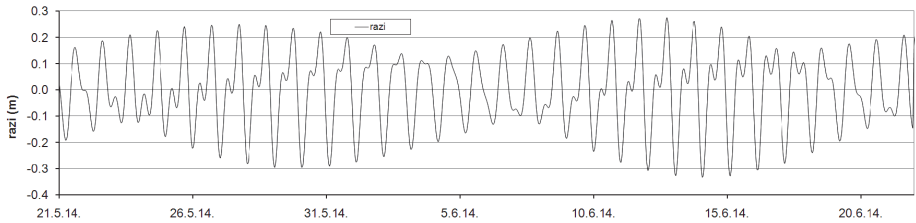
Za provedbu numeričkih simulacija upotrijebljen je trodimenzijski numerički model Mike 3f - metoda konačnih volumena i model MikeM3 - metoda konačnih diferencija (www.dhigroup.com). Modelirano područje obuhvaća područje akvatorija marine Ičići prema slici 2. U modelu konačnih volumena prostorna diskretizacija u horizontalnom smjeru ima varijabilnu udaljenost između težišta susjednih triangularnih ćelija, od maksimalno 4 m do minimalno 1 m (slika 2.). U vertikalnom smjeru upotrijebljen je površinski 1 sigma sloj, a ispod njega 3 "z" sloja debljine 0,5 m te 7 "z" slojeva debljine 1 m. Numerički model ima oko 32 000 "mokrih" ćelija. U modelu konačnih diferencija upotrijebljena je prostorna diskretizacija  $\Delta x = \Delta y = 2$  m u horizontalnom i  $\Delta z = 0,5$  m u vertikalnom smjeru (slika 2.). Numerički model ima oko 105 000 "mokrih" točaka. Na modeliranom području postavljene su "krute" i "otvorene-tekuće" granice. Krute granice odgovaraju liniji kontakta akvatorijalnog dijela s linijom "prirodne" ili "umjetne" obale. Te granice su nepropusne i brzine okomite na granicu toka jednake su nuli.



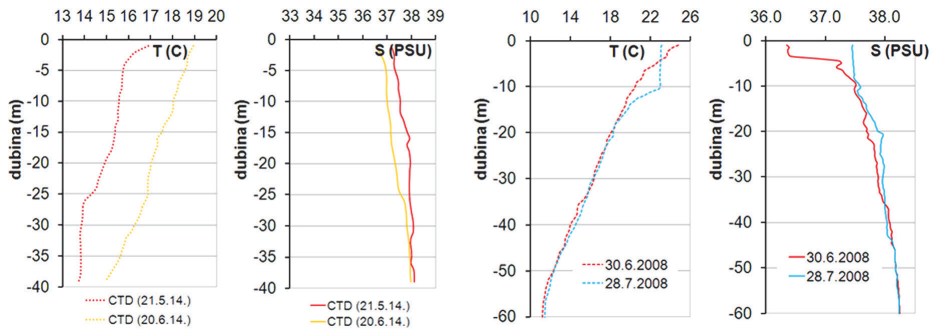
Slika 2. Područje obuhvaćeno prostornom domenom numeričkoga modela utemeljenog na: a) metodi konačnih diferencija (lijevo) i primijenjenom modelskom diskretizacijom na batimetrijskoj podlozi za situaciju 2) sa stvarnim položajem propusta i situaciju 3) s hipotetskom pozicijom propusta; b) metodi konačnih volumena (desno) i primijenjenom modelskom diskretizacijom s konačnim trokutastim ćelijama (volumenima) na batimetrijskoj podlozi za situaciju 3) s hipotetskom pozicijom propusta

Modelskim simulacijama obuhvaćena su dva vremenska razdoblja. Prvo razdoblje je 21. 5. 2014. - 20. 6. 2014., a drugo je 30. 6. 2008. - 28. 7. 2008. U oba razdoblja model je na otvorenoj granici forsiran satnom dinamikom morske razine koja je varijabilna tijekom provedenih simulacija. Vremenski nizovi morske razine dobiveni su na temelju podataka o amplitudama i fazama 7 osnovnih konstituenata plimnoga signala za lokaciju Bakar [7, 8] (slika 3.). U analizama vezanima uz prvo vremensko razdoblje (21. 5. 2014. - 20. 6. 2014.), u vertikalnom profilu otvorenih granica modela upotrijebljena su nestacionarna polja temperature i saliniteta dobivena na temelju mjerenja na CTD vertikalni luke Opatija (slika 4.) u terminima 21. 5. 2014. i 20. 6. 2014. Mjerenje u terminu 21. 5. 2014. primijenjeno je u formulaciji početnih uvjeta, pri čemu su izmjerene vrijednosti upotrijebljene za modelsku vertikalnu raspodjelu temperature i saliniteta mora, dok je u horizontalnom smjeru upotrijebljeno homogeno polje temperature i saliniteta. U analizama vezanima uz drugo vremensko razdoblje (30. 6. 2008. - 28. 7. 2008.) upotrijebljena su polja temperature i saliniteta s CTD postaje koja se nalazila u sredini riječkog zaljeva [9] te je primijenjen analogni pristup po pitanju otvorenih granica (temperatura i salinitet mora iz mjerenja u terminima 30. 6. i 28. 7. 2008., slika 4.) i početnih uvjeta (vertikalna raspodjela temperatura i saliniteta mora iz mjerenja u terminu 30. 6. 2008.).

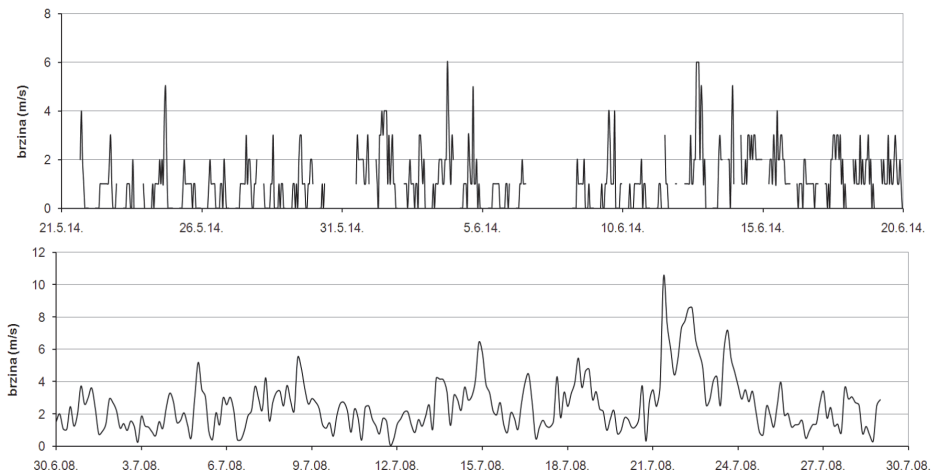
Na kontaktu mora i atmosfere model je forsiran s poljem brzine vjetra, pri čemu je za koeficijent trenja usvojena vrijednost 0,0016 [10]. Za prvo analizirao razdoblje (21. 5. 2014. - 20. 6. 2014.) upotrijebljeni su vremenski nizovi brzina (slika 5.) i smjera vjetra na anemometarskoj postaji Opatija, dok su za drugo razdoblje (30. 6. 2008. - 28. 7. 2008.) upotrijebljeni nizovi brzina (slika 5.) i smjera vjetra iz modela Aladin-HR [11].



Slika 3. Vremenski niz morskih razina upotrijebljen kao rubni uvjet na otvorenoj granici modela cirkulacije vode tijekom prvog simulacijskog razdoblja (21. 5. – 20. 6. 2014.)



Slika 4. Vertikalne distribucije temperature i saliniteta mora u CTD profilu luka Opatija za prvo simulacijsko razdoblje (lijevo) te u CTD profilu u sredini Riječkog zaljeva za drugo simulacijsko razdoblje (desno)



Slika 5. Vremenski nizovi brzine vjetra izmjerene na anemometrijskoj postaji Opatija u periodu 21. 5. – 20. 6. 2014. (gore) i iz modela Aladin-HR za drugo simulacijsko razdoblje (dolje)

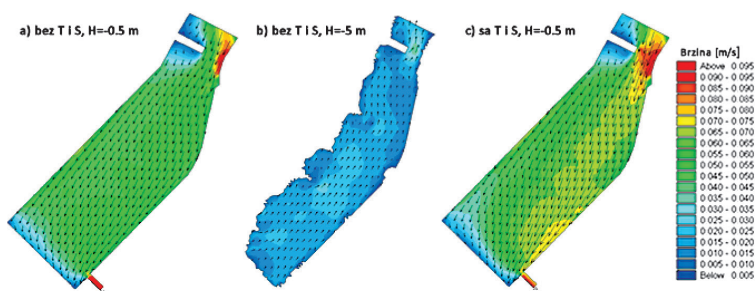
Zatvaranje modela turbulencije u modelu Mike 3 oslanja se na  $k-\varepsilon$  formulaciju [12] u vertikalnom smjeru i koncepciju Smagorinskyja [13] u horizontalnom smjeru. Koeficijenti turbulentne disperzije za skalarna polja temperature i saliniteta definirani su faktorima proporcionalnosti (Prandtlov broj) 0,8 u vertikalnom smjeru i 0,15 u horizontalnom smjeru. Faktori proporcionalnosti za polja turbulentne kinetičke energije (TKE) i disipacije ( $\varepsilon$ ) prihvaćeni su s vrijednostima 1 (TKE) i 1,3 ( $\varepsilon$ ) u horizontalnom i u vertikalnom smjeru. Hrapavost i koeficijent Smagorinskyja u modelu su prihvaćeni kao prostorno homogeni s vrijednostima 0,01 m i 0,2.

Za procjenu doprinosa strujanja generiranoga promjenom temperature i saliniteta mora na otvorenoj granici u cjelokupnoj izmjeni mora prvotno su provedene simulacije koje uključuju varijabilitet gustoće mora (temperatura i salinitet mora). Nakon toga su simulacije ponovljene bez uzimanja u obzir vremenskoga varijabiliteta temperature i saliniteta mora, odnosno samo s forsiranjem dinamike morskih razina i vjetrovom.

Budući da je brzina vjetra u drugom analiziranom razdoblju (30. 6. – 28. 7. 2008.) bila prosječno dvostruko veća nego u prvom analiziranom razdoblju (21. 5. – 20. 6. 2014.), rezultati numeričkih simulacija trebaju poslužiti u prepoznavanju intenziteta utjecaja vjetra na cirkulaciju i izmjenu vode unutar akvatorija marine. Uspoređuju se samo rezultati simulacija u kojima nije uzet u obzir varijabilitet temperature i saliniteta mora.

### 3. Rezultati i rasprava

Na slici 6. prikazana su satno usrednjena polja strujanja na dubinama -0,5 m i -5 m za prvo simulacijsko razdoblje u terminu 3. 6. 2014. u 18:00 h. Prikazani rezultati dobiveni su modelom konačnih volumena, s forsiranjem modela na otvorenoj granici bez temperature i saliniteta mora i s njima. Vidljivo je da su brzine strujanja veće na dubini -0,5 m za slučaj forsiranja poljem temperature i saliniteta.

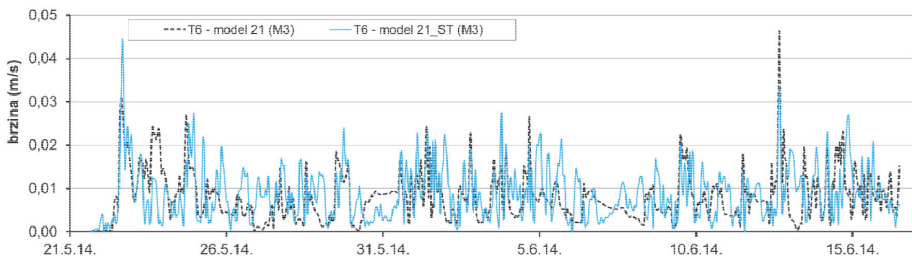


Slika 6. Satno usrednjena polja strujanja na dubini 0,5 m (lijevo – forsiranje bez temperature i saliniteta mora, desno – forsiranje s temperaturom i salinitetom mora) i -5 m (sredina – forsiranje bez temperature i saliniteta mora) za 3. 6. 2014. u 18:00 h za situaciju 2 sa stvarnim položajem propusta i model konačnih volumena

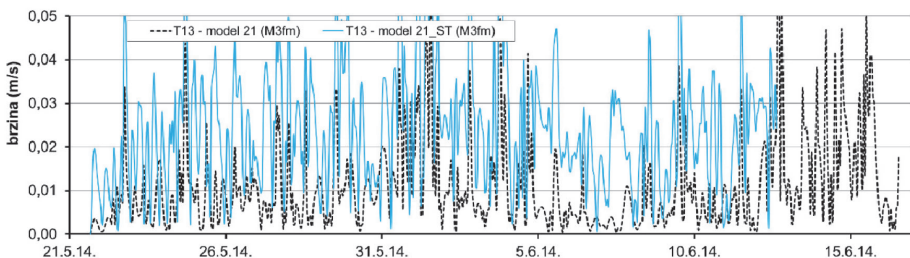
Na slici 1. prikazane su pozicije 13 karakterističnih točaka u marini u kojima su uspoređene srednje brzine strujanja za slučaj forsiranja bez temperature i saliniteta i s njima za različite pozicije propusta primjenom metoda konačnih diferencija i konačnih volumena.

Na slici 7. prikazane su komparativni vremenski nizovi brzine strujanja za točku 6 unutar akvatorija marine za situaciju 2 s propustom na stvarnoj poziciji. Prikazani modelski rezultati dobiveni su modelom konačnih diferencija forsiranjem bez temperatura i saliniteta mora i s njima. Na slici 8. prikazane su usporedni nizovi brzine strujanja za točku 13 za situaciju 2 s propustom na stvarnoj poziciji. Prikazani rezultati dobiveni su modelom konačnih volumena forsiranjem bez temperature i saliniteta.

Rezultati prikazani na slikama 7. i 8. upućuju na značajan utjecaj temperature i saliniteta mora na intenzitet i varijabilnost strujanja. Najveća je razlika uočena na pozicijama točaka 11, 12 i 13, koje se nalaze u blizini otvorene granice. Shodno tome, uočene razlike su dijelom posljedica i "blizine" rubnog uvjeta (problem numeričke formulacije), te ne odražavaju nužno stvarnu fiziku procesa. Ovaj je neželjeni učinak manje izražen u rezultatima dobivenima modelom konačnih volumena u odnosu na model konačnih diferencija.

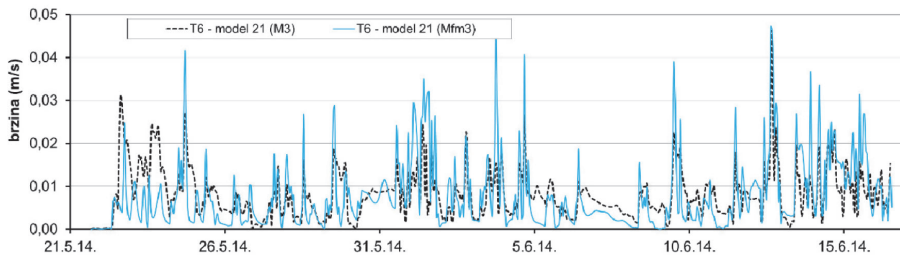


**Slika 7.** Komparativni vremenski nizovi brzine strujanja za točku 6 unutar akvatorija marine na dubini -0.5 m (situacija 2 sa stvarnim položajem propusta; model konačnih diferencija (M3), forsiranje s temperaturom i salinitetom mora (ST) i bez njih)



**Slika 8.** Komparativni vremenski nizovi brzine strujanja za točku 13 unutar akvatorija marine na dubini -0.5 m (situacija 2 sa stvarnim položajem propusta; model konačnih volumena (M3fm), forsiranje s temperaturom i salinitetom mora (ST) i bez njih)

Rezultati prikazani na slici 9. daju usporedbu brzina strujanja za slučaj stvarne pozicije propusta primjenom modela konačnih diferencija i modela konačnih volumena bez utjecaja temperature i saliniteta. Vidljivo je da modelsko strujanje ima sličan varijabilitet u promatranoj točki, dok su srednje brzine strujanja za analizirano razdoblje veće za približno 10 % u slučaju primjene modela konačnih diferencija. Sličnost brzina struja je izraženija za točke koje se nalaze u "zatvorenijem" dijelu marine (točke 1-10), kao posljedica smanjenog utjecaja otvorene granice modela (ulaz u marinu). Amplitude brzine strujanja su općenito veće u slučaju primjene modela konačnih volumena.



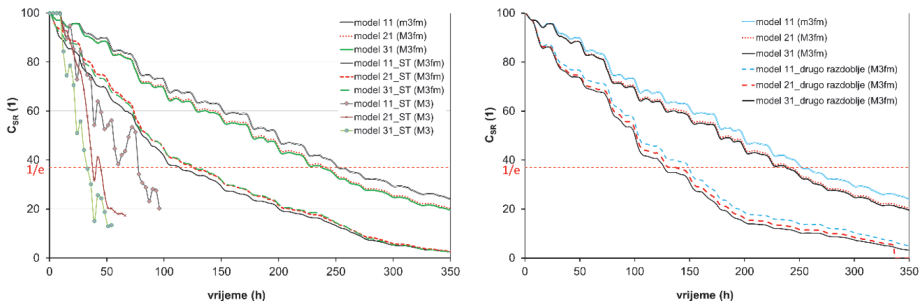
Slika 9. Komparativni vremenski nizovi brzine strujanja za točku 6 unutar akvatorija marine na dubini -0.5 m (situacija 2 sa stvarnim položajem propusta; model konačnih diferencija (M3) i konačnih volumena (Mfm3); bez utjecaja temperature i saliniteta mora)

U nastavku su prikazani rezultati numeričke analize izmjene mora koristeći parametar tzv. e-flushing vrijeme. Vremenski niz srednjih koncentracija traserske otopine  $C_{SR}$  (1) u štíćenom akvatoriju marine (odnos između ukupnog volumena vode i volumena traserske otopine u akvatoriju marine u promatranom trenutku) prikazan je na slici 10. Dobivene su vrijednosti e-flushing vrijeme  $\approx 259$  h za situaciju 1,  $\approx 245$  h za situaciju 2 te  $\approx 240$  h za situaciju 3 (prvo simulacijsko razdoblje, model konačnih volumena, forsiranjem bez temperature i saliniteta mora). U slučaju primjene forsiranja s temperaturom i salinitetom mora dobivene su vrijednosti e-flushing vrijeme  $\approx 115$  h za situaciju 1,  $\approx 127$  h za situaciju 2 te  $\approx 129$  h za situaciju 3 (prvo simulacijsko razdoblje, model konačnih volumena).

Prema tome, ako nije uzet u obzir utjecaj temperature i saliniteta mora, doprinos propusta na postojećoj poziciji (situacija 2) je izražen kroz smanjenje e-flushing vremena za 5 % u odnosu na situaciju bez propusta (situacija 1). Nadalje, doprinos propusta na hipotetskoj poziciji (situacija 3) je izražen kroz smanjenje e-flushing vremena za 8 % u odnosu na situaciju bez propusta (situacija 1).

Forsiranje s temperaturom i salinitetom mora daje značajno smanjenju e-flushing vremena. U tom slučaju izvedba propusta na postojećoj poziciji (situacija 2) čak uvećava e-flushing vrijeme za 10 % u odnosu na situaciju bez propusta (situacija 1), dok izvedba propusta na hipotetskoj poziciji (situacija 3) uvećava e-flushing vrijeme za 12 % (slika 10.).

U drugom simulacijskom razdoblju, u kojem se pojavljuje intenzivnije djelovanje vjetera e-flushing vremena su znatno kraća, te iznose 150 h za situaciju 1, 14 h za situaciju 2 te 128 h za situaciju 3 (model konačnih volumena, forsiranje bez temperatura i saliniteta mora). Primjenom modela konačnih diferencija rezultati su značajno izmijenjeni, poglavito u slučaju primjene forsiranja s temperaturom i salinitetom mora (slika 10.). Doprinos propusta u izmjeni mora (izražen parametrom e-flushing vremena) znatno je izraženiji nego u slučaju primjene modela konačnih volumena. Primjerice, ako nije uzet u obzir utjecaj temperature i saliniteta mora, e-flushing vrijeme iznosi 285 h za situaciju 1 (bez propusta) i samo 70 h za situaciju 2 (propust na postojećoj poziciji). Nadalje, forsiranje s temperaturom i salinitetom mora smanjuje e-flushing vrijeme na 45 h u situaciji 2 (propust na postojećoj poziciji).



Slika 10. Komparativni vremenski nizovi koncentracija traserne otopine  $C_{SR}(t)$  u šticienom akvatoriju marine za analizirane situacije 1 (oznaka model 11), 2 (oznaka model 21) i 3 (oznaka model 31) dobivene primjenom modela konačnih volumena (oznaka M3fm) i modela konačnih diferencija (oznaka M3fm), forsiranjem s temperaturom i salinitetom mora te bez njih (oznaka ST – primjena forsiranja s temperaturom i salinitetom mora) – lijevo, te forsiranja bez temperatura i saliniteta za drugo razdoblje u kojem je intenzivnije djelovanje vjetera – desno

## 4 Zaključak

Provedena je numerička analiza utjecaja cijevnih propusta na cirkulaciju vode u marini lčići primjenom metoda konačnih diferencija i konačnih volumena. Analizirana je dinamika strujanja na različitim pozicijama u marini primjenom metoda konačnih volumena i diferencija s utjecajem temperature i saliniteta i bez njega. Kvantificiran je doprinos postojanja propusta (na dvije različite pozicije) u odnosu na situaciju bez propusta uzimajući u obzir razlike u gustoći (promjene temperature i saliniteta) i utjecaj vjetera. Usporedbom brzine strujanja u karakterističnim točkama u marini uočen je značajan utjecaj polja temperature i saliniteta na varijabilnost i intenzitet strujanja. Razlike su uočljivije u točkama blizu rubnih uvjeta dok su razlike manje izražene u rezultatima dobivenima modelom konačnih volumena u odnosu na model konačnih diferencija.



Sličnost brzina strujanja izraženija je u "zatvorenijem" dijelu marine, dalje od rubnih uvjeta.

Metodom konačnih volumena forsiranjem s temperaturom i salinitetom značajno je smanjeno e-flushing vrijeme, što upućuje na važnost uzimanja u obzir razlika u gustoći na cirkulaciju vode. Usporedbom e-flushing vremena bez utjecaja temperature i saliniteta za prvo i drugo razdoblje uočava se značajan doprinos vjetra na smanjenje e-flushing vremena. Izvedba propusta na hipotetskoj poziciji daje najmanje e-flushing vrijeme za slučaj forsiranja bez temperature i saliniteta za prvo simulacijsko razdoblje i za drugo simulacijsko razdoblje u kojem je intenzivniji utjecaj vjetra. U prvom simulacijskom razdoblju uzimajući u obzir temperaturu i salinitet najmanje e-flushing vrijeme dobiveno je za situaciju bez propusta. Valja imati na umu da su propusti u modelu uzeti kao kanal sa slobodnim vodnim licem, dok su u stvarnosti to cijevi kojima je os na srednjoj razini mora što treba uvažiti u daljnjim analizama.

Dobiveni rezultati pokazuju da razlike u gustoći i vjetar imaju značajan utjecaj na dinamiku strujanja u marini i trebaju biti uzeti u obzir pri analizi strujanja. Hipotetska pozicija propusta nasuprot ulaza u marinu u većini slučajeva pokazala se najboljom za poboljšanje izmjene mora. U nastavku istraživanja predviđaju se terenska mjerenja u marini Ičići (u sklopu projekta EKOMARINA) kako bi se mogli valorizirati dobiveni numerički rezultati te dobiti sveobuhvatni uvid u stvarne procese.

## Literatura

- [1] Falconer, R.A., Gouping, Y.: Effects on depth, bed slope and scaling on tidal currents and exchange in a laboratory model harbor. Proc. Institution civil engineers. Part 2 research & theory, Volume 91, pp. 561-576, 1991.
- [2] Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H.: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, London, 1979.
- [3] Nece, R.A.: Planform effects on tidal flushing of marinas. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 110 (1984) 2, pp. 251-269.
- [4] Schwartz, R.A.: Flushing behavior of a coastal marina, Twenty-First Coastal Engineering Conference, Malaga, Spain, 1988.
- [5] Jouon, A., Doulliet, P., Ouillon, S., Fraunie, P.: Calculation of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using 3D hydrodynamic model. Continental shelf research, 26 (2006) 12, pp. 1395-1415.
- [6] Cucco, A., Umgiesser, G.: Nodeling the venice lagoon residence time, Ecological modelling, 194 (2006), pp. 34-51.
- [7] Janeković, I., Bobanović, J., Kuzmić, M.: The Adriatic Sea M2 and K1 tides by 3D model and data assimilation, Estuarine Coastal and Shelf Science, 57 (2003) 5-6, pp. 873-885.

- [8] Janeković, I., Kuzmić, M.: Numerical simulation of the Adriatic Sea principal tidal constituents, *Ann. Geophys.*, 23 (2005), pp. 3207-3218.
- [9] Andročec, V., Beg-Paklar, G., Dadić, V., Djakovac, T., Grbec, B., Janeković, I., Krstulović, N., Kuspilić, G., Leder, N., Lončar, G., Marasović, I., Precali, R., Šolić, M.: *The Adriatic Sea Monitoring Program - Final Report*, Zagreb, 2009.
- [10] Wu, J.: The sea surface is aerodynamically rough even under light winds, *Boundary layer Meteorology*, 69, pp. 149-158, 1994.
- [11] DHMZ: [www.meteo.hr](http://www.meteo.hr)
- [12] Rodi, W.: Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids, *Journal of Geophysical Research*, 92, (C5), pp. 5305-5328, 1987.
- [13] Smagorinsky, J.: Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities, In: *Large eddy simulations of complex engineering and geophysical flows*, (eds. Galperin, B., Orszag, S.)



# Hladnooblikovani tankostijeni C profili naprezani na savijanje

Marko Ptiček<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Darko Dujmović<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ivicom Consulting d.o.o., Damira Tomljanovića Gavrana 11, Zagreb, [marko.pticek@ivicom.hr](mailto:marko.pticek@ivicom.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, [dujmovic@grad.hr](mailto:dujmovic@grad.hr)

## Sažetak

Rad obrađuje ponašanje hladnooblikovanih tankostijenih C profila naprezanih na savijanje. Opisani su modovi otkazivanja hladnooblikovanih C profila: lokalno i distorzijsko izbočavanje te bočno-torzijsko izvijanje. Modovi otkazivanja analizirani su metodom konačnih traka u računalnom programu "CUFSM" i zasebno opisani s pripadnim karakteristikama. Dan je pregled osnovnih metoda proračuna konstrukcijskih elemenata izvedenih iz hladnooblikovanih tankostijenih čeličnih profila (metoda efektivne širine i direktna metoda procjene otpornosti) na kojima se temelje aktualne norme. Također, u radu su istaknute prednosti i nedostaci navedenih metoda proračuna.

*Ključne riječi: hladnooblikovani tankostijeni C profil, modovi otkazivanja, metoda efektive širine, direktna metoda procjene otpornosti*

## Cold-formed thin-walled lipped channel sections in bending

### Abstract

The behaviour of cold-formed thin-walled lipped channel sections in bending is considered in the paper. Buckling modes: local, distortional, and global, are described. Buckling modes are analysed using the finite strip method in the "CUFSM" software, and are described separately with associated characteristics. An overview of basic cold-formed thin-walled design methods (effective width method and direct strength method) on which the current design standards are based is also given. In addition, the advantages and disadvantages of these design methods are presented in the paper.

*Key words: cold-formed thin-walled lipped channel sections, buckling modes, effective width method, direct strength method*

## 1 Uvod

Pored konstrukcijskih elemenata izvedenih iz vruće valjanih profila u suvremenoj izvedbi čeličnih konstrukcija vrlo je učestala primjena konstrukcijskih elemenata izvedenih iz hladnooblikovanih profila. Za razliku od vruće valjanih, proizvodnja hladnooblikovanih elemenata provodi se oblikovanjem ravnih traka i tankih limova pri sobnoj temperaturi procesom hladnog valjanja, savijanja ili prešanja. Uobičajene debljine osnovnoga materijala kreću se od 0,4 mm do 6,0 mm i konačni proizvod ima konstantnu debljinu stijenke po cijelom poprečnom presjeku. Primjena hladnooblikovanoga čelika ubrzano se povećava diljem svijeta i njegova popularnost temelji se na:

- izvrsnom omjeru nosivosti i težine konstrukcije, rezultirajući pritom manjim utroškom čelika,
- sofisticiranom proizvodnji s manjim tolerancijama,
- kompaktnim pakiranjem i transportom proizvoda,
- njihovom brzom i jednostavnom montažom.

Proizvodi dobiveni od čeličnih limova hladnim oblikovanjem svoju primjenu nalaze u svim granama industrije i primjenjujemo ih u svakodnevnom životu, a nosivi građevinski elementi ponajprije se upotrebljavaju kao glavni i okvirni nosači, elementi rešetke, sekundarni krovni i fasadni nosači, pokrovni i nosivi limovi, zidne potkonstrukcije te kao elementi nosivih sustava u skladištima.

Zbog karakterističnoga načina proizvodnje i uporabe razmjerno tankog materijala, hladnooblikovane nosače karakteriziraju specifične mehaničke karakteristike, kao i posebni načini otkazivanja. Procesom hladnoga oblikovanja dolazi do povećanja granice popuštanja  $f_y$  i čvrstoće  $f_u$  uz smanjenje duktilnosti. Povećanje granice popuštanja najizraženije je u uglovima profila i na mjestima ukrućenja, tj. općenito u zonama presavijanja [1, 2], i uzima se u obzir prilikom proračuna kako bi se dobila bolja iskoristivost i u konačnici ekonomičniji utrošak čelika.

Potražnja za materijalima visoke čvrstoće i širokog raspona primjene omogućila je brži napredak u područjima vezanima uz hladnooblikovani čelik u odnosu na toplo valjani. Stoga, razumijevanje ponašanja hladnooblikovanoga čelika postaje važno pitanje koje treba proučavati. Hladnooblikovani profili za izradu čeličnih konstrukcija kontinuirano se optimiziraju kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i manji utrošak čelika. U skladu s navedenim, hladnooblikovani profili izvode se sa sve većom vitkošću. Na taj način njihovo ponašanje, a time i njihova nosivost, podliježe složenim utjecajima lokalnih i globalnih instabiliteta te njihovoj interakciji.

Znanstvene spoznaje o konstrukcijskim elementima dobivenima hladnim oblikovanjem, kao i mogućnost njihove primjene, izuzetno je široka i pokriva različite oblike poprečnih presjeka te njihovo ponašanje do otkazivanja [3, 4]. Što se hladnooblikovanih profila tiče, oni se sa znanstvenoga gledišta promatraju ovisno o načinu naprezanja: naprezani na savijanje (nosači), uzdužno naprezani (stupovi) i naprezani istovremeno na savijanje

i tlak (nosači-stupovi). Najbolji primjer elemenata napreznih na savijanje su nosači na koje su oslonjeni krovni ili zidni paneli. Njihov statički sustav može biti ili jednostavno oslonjen nosač ili kontinuirani nosač s jednoliko raspodijeljenim pritiskajućim ili odižućim djelovanjem. Poprečni presjeci hladnooblikovanih profila u mnogim su slučajevima otvorenoga tipa. Najčešće rabljeni poprečni presjeci su  $U$  (engl. *Plain channel section*),  $C$  (engl. *Lipped channel section*),  $Z$  (engl. *Zed section*) i  $\Omega$  (engl. *Top hat section*). U ovom radu razmatraju se jednoosno simetrični  $C$  profili, načini njihova otkazivanja te metode proračuna. Jedna od vrlo bitnih značajki ovakvih profila napreznih na savijanje pojava je torzije, budući da se težište i centar posmika ne poklapaju.

## 2 Modovi otkazivanja

### 2.1 Općenito

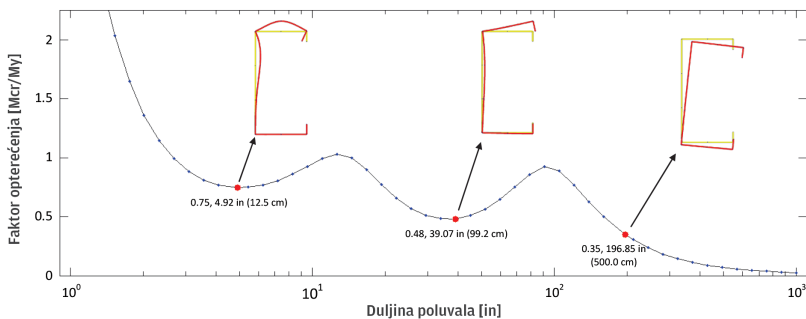
Ponašanje konstrukcijskih elemenata izvedenih iz hladnooblikovanih profila napreznih na savijanje karakterizirano je složenim problemima stabilnosti. Procjena otpornosti takvih elemenata nije jednostavna zbog brojnih mogućih mehanizama otkazivanja:

- dosezanje granice popuštanja,
- lokalno izbočavanje,
- distorzijsko izbočavanje,
- bočno-torzijsko izvijanje
- interakcija lokalnoga i globalnog instabiliteta.

Pregledom literature ustanovljeno je da otkazivanje hladnooblikovanih nosača bočno-torzijskim izvijanjem nije dovoljno istraženo, [5, 6]. Također, postojeće norme predviđaju otpornosti koje mogu značajno varirati [5]. Istražujući interakciju lokalnih i distorzijskih instabiliteta s bočno-torzijskim izvijanjem kod nosača od hladnooblikovanih  $C$  profila, Nandini i Kalyanaraman [6] pokazali su da proračuni otpornosti prema normama EN1993-1-3 [7] i AISI [8] daju nepouzdan rezultate. Rezultat njihovoga istraživanja je i preporuka o korekciji jedne od metoda za procjenu pouzdanosti hladnooblikovanih profila poznatoj pod nazivom "Direktna metoda procjene otpornosti" (engl. *Direct strength method - DSM* [9]). Dolamune Kankanamge i Mahendran [10] proveli su eksperimentalna ispitivanja i opsežnu parametarsku analizu  $C$  profila napreznih na savijanje. Autori predlažu izmjene normi za proračun otpornosti, ističući pritom kako EN1993-1-3 [7] daje suviše konzervativne rezultate, dok s druge strane AS/NZS [11] i AISI [8] precjenjuju otpornost.

Na slici 1. prikazan je rezultat analize jednostavno oslonjenoga nosača tankostijenog  $C$  profila visine 250 mm, širine pojasnica 125 mm s ukrutama od 25 mm i debljine stijenke 3 mm, napreznog na savijanje, metodom konačnih traka (eng. *Finite strip method - FSM*) u računalnom programu *CUFEM - Finite Strip Buckling Analysis of Thin-Walled Members* [12]. Proračunom je dobivena karakteristična krivulja, tzv. *Signature curve*

[13], iskazana duljinom poluvala na osi apscise i faktorom opterećenja (omjer kritičnog momenta za pojedini mod i momenta tečenja - otpornost dosegnuta dosežanjem  $f_y$  u rubnom vlakancu) na osi ordinate te su vidljiva tri različita moda otkazivanja: lokalni, distorzijski i globalni mod (bočno-torzijsko izvijanje). Za lokalni i distorzijski mod istaknuti su minimumi krivulje karakteristični za analizirani poprečni presjek. Dobiveni minimumi predstavljaju kritične momente kod kojih dolazi do takvog izbočavanja s pripadnom valnom duljinom izbočina. Duljina poluvala globalnoga moda je za ovakav jednostavan primjer jednaka duljini cijelog elementa. To znači da svaka točka trećega dijela krivulje sa slike 1. predstavlja element zadanog poprečnog presjeka, ali različitog raspona.



Slika 1. Modovi otkazivanja hladnooblikovanoga C profila napreznog na savijanje

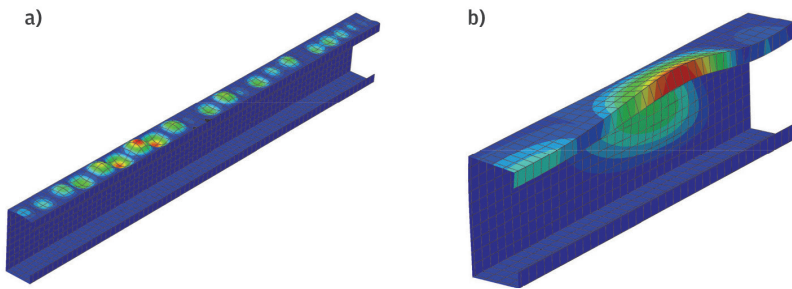
Metoda konačnih traka je inačica metode konačnih elemenata pogodna za analizu tankostijenih nosača jer omogućuje detekciju i klasifikaciju modova otkazivanja. Diskretizacija se vrši po čitavoj duljini nosača samo s jednim konačnim elementom - trakom. Primjena metode konačnih traka za proračun tankostijenih profila je i dalje predmet istraživanja [14].

## 2.2 Lokalno izbočavanje

Tlačno naprezanje u opterećenom nosaču uzrokuje lokalno izbočavanje koje se manifestira izbočinama u pojedinim pločastim elementima tankostijenoga nosača bez relativnog pomaka čvorova u zonama presavijanja, slika 2.a. Za tankostijene nosače do lokalnog izbočavanja može doći u tlačnoj pojasnici i dijelu hrpta koji je pod tlačnim naponom i karakterizano je ponavljajućim i relativno kratkim duljinama poluvalova u odnosu na druge modove. Duljina poluvala lokalnoga izbočavanja jednaka je širini pojedinog pločastog elementa tankostijenog nosača. Izraz za elastično kritično naprezanje koje pretihodi lokalnom izbočavanju pločastog elementa širine  $b$  i debljine stijenke  $t$  glasi:

$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (1)$$

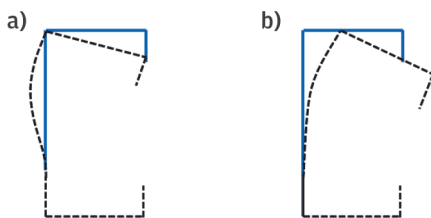
gdje je  $k$  koeficijent izbočavanja koji ovisi o rubnim uvjetima ploče (jednostavno oslonjen, upeti ili slobodan rub) i načinu naprezanja ploče (tlačno, posmično, na savijanje). Ako se razmatra slučaj da je kritično lokalno naprezanje iz izraza (1) manje od granice popuštanja  $f_y$ , lokalno izbočavanje javlja se prije dosezanja granice popuštanja. Prema tome, ovakvo ponašanje dovodi do značajne redukcije kapaciteta otpornosti nosača. No lokalno izbočavanje ne znači nužno i otkazivanje otpornosti, jer hladnooblikovane tankostijene nosače karakterizira i značajna postkritična otpornost. Postkritična rezerva se uzima u obzir prilikom proračuna, jer bi dimenzioniranje na kritično lokalno naprezanje bilo neekonomično.



Slika 2. Trodimenzionalni prikaz lokalnog i distorzijskog moda izbočavanja nosača napreznog na savijanje: a) Lokalno izbočavanje; b) Distorzijsko izbočavanje

### 2.3 Distorzijsko izbočavanje

Tankostijeni nosač izložen savijanju ili uzdužnom tlaku s djelotvornim bočnim pridržanjima za sprječavanje globalnoga izvijanja podložan je distorzijskom modu izbočavanja, slika 2.b. Distorzija je povezana s prisutnošću rubnih ukrućenja koja poboljšavaju otpornost, ali dovode do pojave ovog instabiliteta. Za razliku od lokalnog moda, u distorzijskom postoje pomaci i deformacije u zonama presavijanja uzduž nosača. Duljine poluvalova općenito su reda veličine između lokalnog i globalnog moda te uobičajeno nekoliko puta veće od najveće karakteristične dimenzije presjeka. Slično kao i kod lokalnoga moda, distorziju karakterizira postkritična otpornost, ali relativno manjeg kapaciteta.



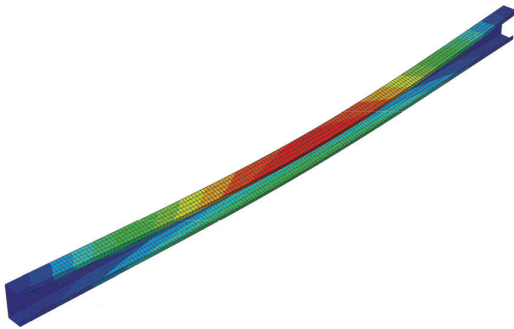
Slika 3. Distorzijsko izbočavanje nosača napreznog na savijanje: a) Distorzija pojasnice; b) Lateralna distorzija



Za nosače naprezane na savijanje postoje dva načina distorzijskog izbočavanja: distorzija pojasnice i lateralna distorzija, slika 3. Do distorzija pojasnice dolazi rotacijom tlačne pojasnice i rubne ukrute oko spojnice hrpta i pojasnice uz određeni utjecaj rotacijske krutosti hrpta. Ovakav instabilitet načešće se pojavljuje kod tankostijenih hladnooblikovanih nosača izvedenih od čelika visoke čvrstoće s otvorenim poprečnim presjecima kao što su C i Z profili. Lateralna distorzija pojavljuje se u slučajevima kad je vlačna pojasnica bočno pridržana i uključuje poprečno savijanje hrpta.

## 2.4 Bočno-torzijsko izvijanje

Najkompleksniji mod otkazivanja je bočno-torzijsko izvijanje do kojega dolazi pri relativno velikim valnim duljinama. Tlačno naprezanje u dijelu poprečnoga presjeka dovodi do nestabilnosti, dok vlačni naponi djeluju stabilizirajuće, a rezultat svega je simultana lateralna translacija i torzija presjeka kao krutog tijela bez deformacija poprečnog presjeka, slika 4. Do bočno-torzijskog izvijanja općenito dolazi u slučajevima presjeka malih krutosti na savijanje oko slabije osi i torzijskih krutosti ako nosač nije kontinuirano bočno pridržan. Upravo su stoga hladnooblikovani tankostijeni nosači otvorenih poprečnih presjeka posebno osjetljivi na bočno-torzijsko izvijanje. Na primjeru poprečnoga presjeka sa slike 1. bočno-torzijsko će izvijanje biti dominantan mod otkazivanja ako je duljina nosača u trećem području krivulje, odnosno veća od otprilike 160 in (406,4 cm), dok će u slučajevima nosača manjeg raspona to biti lokalno ili distorzijsko izbočavanje ili interakcija modova izvijanja.



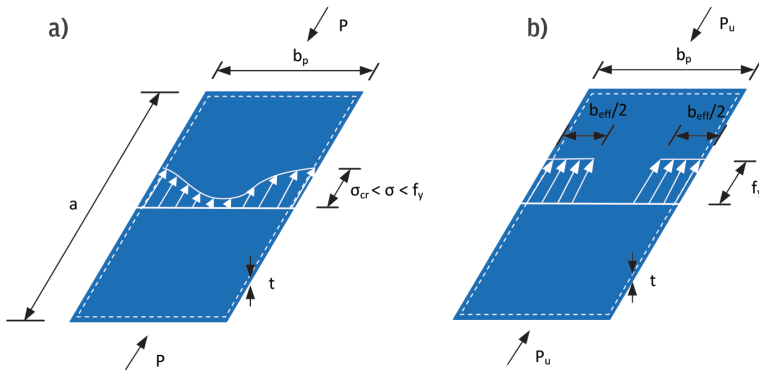
Slika 4. Bočno-torzijsko izvijanje C profila napreznog na savijanje

## 3 Metode proračuna

### 3.1 Metoda efektivne širine

Hladnooblikovani čelični elementi izloženi tlačnom naponu ne otkazuju dosezanjem kritičnoga naprezanja lokalnog izbočavanja. Postkritična otpornost takvoga vitkog elementa moguća je zbog preraspodjele naprezanja. Kako bi se utjecaj lokalnoga izbo-

čavanja vitkog elementa uzeo u obzir, norme kao EN1993-1-3 [7], AISI [8] i AS/NZS [11] predlažu proračun krajnje otpornosti pomoću geometrijskih karakteristika efektivnog presjeka. Takva metoda proračuna naziva se metodom efektivne širine (engl. *Effective width method*).



Slika 5. Slobodno oslonjena tanka ploča: a) Raspodjela naprezanja u postkritičnoj fazi; b) Računski model efektivne širine

Ako se promatra jedna tanka slobodno oslonjena ploča duljine  $a$ , širine  $b_p$ , debljine stijenke  $t$  (npr. tlačna pojasnica C profila), opterećena uzdužnom tlačnom silom, nakon dosezanja kritičnog naprezanja lokalnog izbočavanja  $\sigma_{cr}$  vidljiva je nejednolika raspodjela naprezanja, slika 5.a. U postkritičnoj fazi naprezanje raste iznad razine  $\sigma_{cr}$  dok maksimalno naprezanje ne dosegne granicu popuštanja  $f_y$  kada nastupa otkazivanje elementa. Umjesto nejednolike raspodjele naprezanja po širini elementa, metoda efektivne širine pretpostavlja da se opterećenje prenosi preko efektivne širine  $b_{eff}$  s jednolikom raspodjelom naprezanja, koje je za slučaj krajnje otpornosti jednako granici popuštanja  $f_y$ , slika 5.b. Izraz za efektivnu širinu prvi je postavio von Karman 1932. god. [15], a naknadno ga je modificirao Winter 1947. god. [16] kalibrirajući ga za hladnooblikovane čelične elemente. Proračun postkritične otpornosti je stoga sveden na određivanje efektivne širine  $b_{eff}$ . Izraz za određivanje efektivne širine koji je razvio Winter primjenjuje se još i danas i poznat je kao "Winterova formula":

$$b_{eff} = b_p \quad \text{za} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0.673 \quad (2)$$

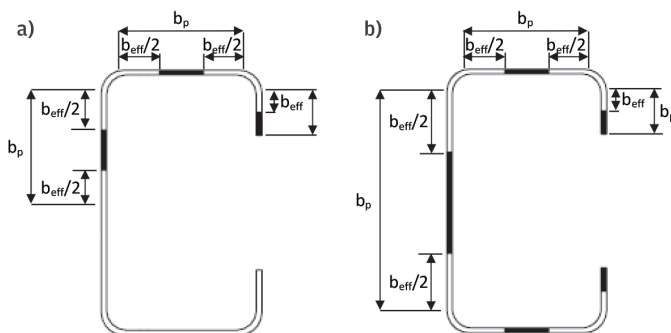
$$b_{eff} = \rho \cdot b_p \quad \text{za} \quad \bar{\lambda}_p > 0.673 \quad (3)$$

$$\rho = \left( 1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}_p} \right) / \bar{\lambda}_p \quad (4)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{1,052}{\sqrt{k}} \cdot \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (5)$$

gdje su  $\rho$  koeficijent redukcije,  $\bar{\lambda}_p$  svedena vitkost ploče,  $k$  koeficijent izbočavanja koji ovisi o rubnim uvjetima ploče (jednostavno oslonjen, upeti ili slobodan rub) i načinu naprezanja ploče (tlačno, posmično, fleksijsko).

U biti ideja je da se utjecaji lokalnog i distorzijskog izbočavanja ploče s nejednolikom raspodjelom naprezanja zamijene s jednolikom raspodjelom na efektivnoj širini ploče. Na taj se način metodom efektivne širine uzimaju u obzir utjecaji lokalnog i distorzijskog izbočavanja. Bočno-torzijsko izvijanje, kao i krajnja otpornost nosača, određuje se preko efektivnih geometrijskih karakteristika poprečnoga presjeka koje se dobivaju određivanjem efektivne širine svakog pojedinog pločastog elementa. Na primjerima nosača od C profila, efektivni presjeci prikazani su na slici 6.



Slika 6. C profil - efektivni poprečni presjeci: a) element naprezan na savijanje; b) tlačno naprezan element

Međutim, u praksi ova metoda može biti izuzetno nepraktična u slučaju složenih i optimiziranih presjeka te presjeka s dodatnim međukrućenjima i rubnim ukrućenjima. Također, svaki pločasti element razmatra se zasebno, a interakcija koja postoji među njima (npr. između hrpta i pojasnice) općenito se zanemaruje.

### 3.2 Direktna metoda procjene otpornosti

Kako bi se nadvladali spomenuti nedostaci metode efektivne širine, Schafer i Peköz [17] razvili su novu metodu za dimenzioniranje nosača izvedenih iz hladnooblikovanih tankostijenih profila, tzv. direktnu metodu procjene otpornosti - "Direct Strength Method" (DSM). Kao i metoda efektivne širine, ova metoda također je semiempirijska i uključuje analizu elastičnog izbočavanja za lokalni, distorzijski i globalni mod kao prvi temeljni korak proračuna. Obje metode zatim kombiniraju elastične vrijednosti izbočavanja s krivuljama izvijanja, ali postupak proračuna otpornosti i krivulje izvijanja znatno se razlikuju. Pojednostavljenije proračuna je jedna od osnovnih ideja DSM metode, te se stoga vrijednosti elastičnih kritičnih sila i momenata određuju za cijeli bruto poprečni

presjek nosača umjesto razmatranja zasebnih pločastih elemenata. Krajnja otpornost,  $M_{ne}$  za nosače (ili  $P_{ne}$  za stupove), minimalna je vrijednost nominalnih otpornosti za lokalno ( $M_n$ ) i distorzijsko ( $M_{nd}$ ) izbočavanje i globalno ( $M_{ne}$ ) izvijanje:

$$M_n = \min(M_{nl}, M_{nd}, M_{ne}) \quad (6)$$

dobivenih iz elastičnih kritičnih vrijednosti za pripadnu vitkost elementa. Za razliku od iscrpljujućeg proračuna metodom efektivne širine, vrijednost pojedine nominalne otpornosti dobiva se u jednom koraku rješavanjem jedne formule. Jedina je nepoznanica elastična kritična sila ili elastični kritični moment, odnosno faktor naprezanja (omjer kritičnog naprezanja i granice popuštanja). Za dobivanje faktora naprezanja preporuča se primjena već spomenutoga računalnog programa "CUFSM" [12]. Računalni program razvili su glavni autor DSM metode i njegov istraživački tim. Za primjer prikazat će se izrazi za određivanje nominalne otpornosti za globalno izvijanje  $M_{ne}$  prema [9]:

$$M_{ne} = M_{cre} \quad \text{za} \quad M_{cre} < 0.56M_y \quad (7)$$

$$M_{ne} = \frac{10}{9}M_y \left( 1 - \frac{10M_y}{36M_{cre}} \right), \quad \text{za} \quad 2.78M_y \geq M_{cre} \geq 0.56M_y \quad (8)$$

$$M_{ne} = M_y \quad \text{za} \quad M_{cre} > 2.78M_y \quad (9)$$

gdje su  $M_{cre}$  elastični kritični moment bočnog-torzijskog izvijanja i  $M_y$  moment tečenja. Godine 2004. DSM metoda je odobrena i prihvaćena u AISI [8] kao dodatak [9] i alternativa konvencionalnoj metodi efektivne širine. Trenutno je DSM metoda formalno prihvaćena u mnogim zemljama kao što su SAD, Kanada, Meksiko, Australija i Brazil. DSM metoda je prilično jednostavan način proračuna tipičnih hladnooblikovanih profila kao što su C, Z i  $\Omega$ . S druge strane, DSM metoda ne omogućava analizu kutnika, kao ni U profila izloženih uzdužnom tlaku. Ovakvi profili podložni su utjecajima lokalnoga izbočavanja koje reducira učinkovitost presjeka i dovodi do pomaka efektivnog težišta. Ovo rezultira ekscentričnim djelovanjem opterećenja te je stoga DSM metoda ograničena samo na hladnooblikovane profile bez značajnih pomaka efektivnoga težišta presjeka. Osim toga, razvijene su preporuke samo za proračun otpornosti nosača i stupova. Proračun otpornosti na posmik i interakcija posmika i savijanja tek je 2012. godine uvrštena u normu [8]. Proračun elemenata istovremeno naprezanih na savijanje i tlak i dalje nedostaje. Međutim u tijeku su istraživanja koja imaju za cilj riješiti spomenute probleme i unaprijediti DSM metodu za široku primjenu proračuna hladnooblikovanih profila.

## 4 Zaključak

U radu su opisani načini otkazivanja nosača od hladnooblikovanih C profila te je dan pregled metoda proračuna. Modovi otkazivanja ovakvih profila su lokalno i distorzijsko iz-

bočavanje te globalno (bočno-torzijsko) izvijanje. Otkazivanje hladnooblikovanih nosača bočno-torzijskim izvijanjem nedovoljno je istraženo te je potrebno budućim istraživanjima omogućiti inženjerima brza i učinkovita rješenja za proračun razvojem adekvatnih normi kako bi se nastavili trendovi povećanja primjene i upotrebe hladnooblikovanih elemenata u graditeljstvu. Postojeće norme za proračun nosivosti hladnooblikovanih profila utemeljene na metodi efektivne širine dovode do složenih i nepraktičnih proračuna, dok je DSM metoda, iako jednostavnija, nedovoljno razvijena za opću primjenu. Istraživanja za unapređenje DSM metode koja su trenutno u tijeku upućuju na to da će se DSM metoda i dalje razvijati, pokrivajući sve šire područje hladnooblikovanih profila. Cilj daljnjih istraživanja je kvantitativna usporedba metoda proračuna hladno oblikovanih C profila pomoću probabilističkih metoda, imati podloge za donošenje odluka sukladno suvremenim normama i znanstveno argumentiranim odlukama o prihvaćanju pojedinih metoda.

## Zahvala

Autori zahvaljuju dr.sc. Ivanu Lukačeviću na velikoj pomoći kod izrade ovog rada.

## Literatura

- [1] Karren, K.W.: *Corner properties of cold-formed steel shapes*, Journal of Structural Divisions, ASCE, 93 (1967), no. ST1, pp. 401-432.
- [2] Karren, K.W., Winter, G.: *Effects of cold-forming on light-gage steel members*, Journal of Structural Divisions, ASCE proceedings, vol. 93, no. ST1, pp. 433-469, 1967.
- [3] Yu, W.W., LaBoube, R.A.: *Cold-Formed Steel Design*, 4<sup>th</sup> ed.: J. Wiley & Sons, 2010.
- [4] Dubina, D., Ungureanu, V., Landolfo, R.: *Design of Cold-formed Steel Structures*, 1<sup>st</sup> ed.: ECCS - European Convention for Constructional Steelwork, 2012.
- [5] Brune, B., Peköz, T.: *Design of cold-formed steel members - comparison of EN 1993-1-3 and Direct Strength Method*, Steel Construction, 6 (2013) 2, pp. 82-94.
- [6] Nandini, P., Kalyanaraman, V.: *Strength of cold-formed lipped channel beams under interaction of local, distortional and lateral torsional buckling*, Thin-Walled Structures, 48(2010), pp. 872-877.
- [7] "EN1993-1-3. Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1 - 3: General Rules, Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting, European Committee for Standardization (ECS), 2006.
- [8] North American specification for the design of cold-formed steel structural members, American Iron and Steel Institute (AISI), 2007.
- [9] Direct Strength Method (DSM), Appendix 1 of the North American specification for the design of cold-formed steel structural members, American Iron and Steel Institute (AISI), 2007.

- [10] Kankanamge, N.D., Mahendran, M.: *Behaviour and design of cold-formed steel beams subject to lateral-torsional buckling*, Thin-Walled Structures, vol. 51, pp. 25-38, 2011.
- [11] Cold-formed steel structures, Australian Standard / New Zealand Standard (AS/NZS), 2005.
- [12] Schafer, B.W., Denry, S.: *Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods*, in International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, FL., USA, 2006.
- [13] Hancock, G.J.: *Local, Distortional, and Lateral Buckling of I-Beams*, Journal of the Structural Division, vol. 104, no. 11, pp. 1787-1798, 1978.
- [14] Li, Z., Abreu, J.C.B., Leng, J., Schafer, B.: *Review: Constrained finite strip method developments and applications in cold-formed steel design*, Thin-Walled Structures, vol. 81, pp. 2-18, 2014.
- [15] von Karman, T., Sechler, E.E., Donnell, L.H.: *The strength of thin plates in compression*, Transactions, ASME, vol. 54, no. 5, 1932.
- [16] Winter, G.: *Strength of Thin Steel Compression Flanges*, Transactions, ASME, vol. 112, no. 1, pp. 527-554, 1947.
- [17] Schafer, B.W., Peköz, T.: *Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Members using Numerical Elastic Buckling Solutions*, Thin-Walled Structures, vol. 36, pp. 137-144, 1998.



# Učinci međudjelovanja tla i konstrukcije u projektiranju sukladno očekivanom odzivu

Adriana Cerovečki<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Dragan Morić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet, [acerovecki@gfos.hr](mailto:acerovecki@gfos.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet, [dmoric@gfos.hr](mailto:dmoric@gfos.hr)

## Sažetak

Popustljivost temeljnog tla utječe na razinu zahtijevane duktilnosti plitko temeljenih konstrukcija. Teorijski, samo se konstrukcija temeljena na osnovnoj stijeni može smatrati upetom, dok plitko temeljene konstrukcije na mekom tlu mogu klizati, tonuti ili se ljuljati. Eurocode 8 navodi kako je učinke međudjelovanja tla i konstrukcija važno uzeti u obzir kod proračuna visokih i vitkih konstrukcija, čime se korisnike navodi da ove učinke nije potrebno razmatrati kod krutih i niskih konstrukcija. Cilj doktorskog rada je baciti novo svjetlo na potresno ponašanje plitko temeljenih konstrukcija.

*Ključne riječi: međudjelovanje tla i konstrukcija, duktilnost, eksperiment u velikom mjerilu, plitki temelji, projektiranje sukladno očekivanom odzivu*

## Effects of soil-structure interaction in performance based design

### Abstract

Foundation soil compliance affects the level of required ductility of shallow founded structures. Theoretically, only structures founded on hard rock can be considered fixed, while shallow founded structures on soft soil can slip, sink, or sway. It is proposed in Eurocode 8 that the effect of soil structure interaction needs to be taken into account when designing tall and slender buildings, which implies that these effects do not have to be considered for low, solid buildings. The aim of this doctoral thesis is to shed new light to the seismic performance of shallow founded structures.

*Key words: soil-structure interaction, ductility, large scale experiment, shallow foundations, performance based design*



## 1 Uvod

Poznato je da je potreba za proračunom konstrukcija na potresno opterećenje velika, a danas postoje brojne metode koje to i omogućavaju. Europske norme EN 1998-1:2004 propisuju razne metode proračuna konstrukcija kao što su: proračun primjenom ekvivalentnog statičkog djelovanja za konstrukcije kod kojih je utjecajan samo prvi ton osciliranja, modalni proračun spektrima odziva za koji ne postoji ograničenje, nelinearna statička metoda postupnoga guranja (engl. pushover) te nelinearni dinamički proračun pomoću vremenskog zapisa. Dugo vremena postoji svijest za potrebom nelinearnog proračuna konstrukcija na potresno opterećenje, te ni interesa za navedenu temu ne nedostaje. Jedan od boljih postupaka je kombiniranje nelinearne statičke metode postupnoga guranja s metodologijom spektralnog odziva, poznat pod imenom metoda N2. Rezultati metode N2 dobro se podudaraju sa situacijom na terenu ako konstrukcija pretežno oscilira u prvome tonu.

Primjena metode N2 podrazumijeva prikupljanje osnovnih podataka o konstrukciji, lokaciji i razredu tla na kojem se nalazi te nakon toga definiranje potresnoga opterećenja u formatu ubrzanje-pomak. Primjenjujući sve prije navedene informacije provodi se metoda postupnog guranja gdje se konstrukciju opterećuje monotono rastućim horizontalnim silama koje simuliraju inercijske sile pri potresu – model konstrukcije koji se postupno gura smatra se upetim u podlogu. Primjenjujući rezultate dobivene metodom postupnoga guranja određuju se potresni zahtjevi na konstrukciju te zatim i procjena ponašanja – analiza oštećenja konstrukcije [1].

U inženjerskoj praksi i znanosti uobičajno je proračune provoditi uz pretpostavku da su konstrukcije upete u nedeformabilnu podlogu. S druge strane, opće je poznato da je u stvarnosti ponašanje konstrukcija uvjetovano popustljivošću medija ispod njih, pa se samo konstrukcija temeljena na osnovnoj stijeni može smatrati upetom. Američki priručnici za proračun konstrukcija [2] upozoravaju da su upeti numerički modeli neprikladni za procjenu potresnoga ponašanja plitko temeljenih konstrukcija koji sadrže krute vertikalne elemente. Novije istraživanje [3] pokazalo je da učinci popustljivosti temeljnoga tla najviše dolaze do izražaja kod konstrukcija s osnovnim periodom osciliranja manjim od 0,6 s. U tom svjetlu, mnoga ranija istraživanja upućuju na važnost uključivanja popustljivosti tla kod procjene potresnoga odziva relativno krutih plitko temeljenih konstrukcija, npr. [4-6].

Uzme li se u obzir da je: veliko područje Europe potresno aktivno i (ii) da gotovo 95% ukupnog svjetskog fonda zgrada čine niske i srednje visoke plitko temeljene zgrade [6] te da (iii) najveći broj ljudi na potresno aktivnom području Europe živi u armiranobetonskim zgradama do 20 katova visine ( $T_1 < 2$  s), čiji su sastavni element krute armiranobetonske jezgre i posmični zidovi, jasno je da postoji vrlo velika potreba za provjerom sigurnosti ovakvih konstrukcija s obzirom na moguće učinke dinamičkog međudjelovanja tla i konstrukcija. Uz to, radovi koji izvještavaju o učincima stvarnih potresa na konstrukcije [8], [9] govore kako su posebice zgrade do 4 kata visine, plitko temeljene na mekim tlima, vrlo

osjetljive na djelovanje potresa. Kod ovakvih zgrada se kao česti problem javlja naginjanje ili prevrtanje, pri čemu konstrukcijski elementi ostaju u potpunosti neoštećeni, odnosno u elastičnom području. Drugačije rečeno, kod ovakvih zgrada konstrukcijski elementi ne ispunjavaju svoju zadaću s obzirom na način na koji su projektirani, tj. nije im omogućeno plastificiranje s ciljem trošenja potresne energije uz očuvanje funkcionalnosti konstrukcije. Nadalje, poznato je da niske do srednje visoke konstrukcije ne posjeduju dovoljnu težinu koja bi spriječila njihovo ljuljanje na temeljnom tlu [10].

Ukratko prikazujući metodu N2 jasno se uočava kako se učinci međudjelovanja tla i konstrukcije ne uzimaju u obzir. Pregledom literature ustanovljeno je da tek dva novija rada [11, 3] daju prijedlog uključivanja popustljivosti temeljnog tla u tu metodu, no zasnivaju se na numeričkim i analitičkim proračunima te traže provjeru s obzirom na eksperiment kao i detaljniju provjeru u svjetlu parametarskih studija. Osnovni cilj doktorskog istraživanja je izvornim eksperimentalnim istraživanjama na modelima u velikom mjerilu te detaljnim parametarskim analizama dodatno istražiti utjecaj popustljivosti temeljnoga tla na potresno ponašanje plitko temeljenih konstrukcija kako bi se razvila nova znanja te podigla razina sigurnosti potresnootpornih konstrukcija.

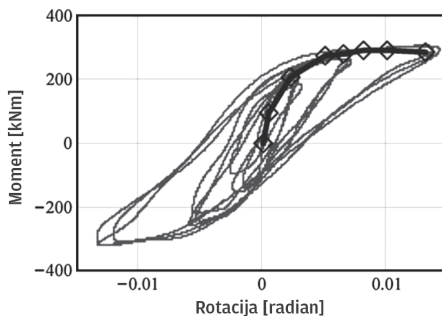
Nadalje, cilj je uspješno provesti eksperimentalno istraživanje na velikim modelima konstrukcija plitko temeljenih na mekom tlu koji imaju mogućnost plastifikacije vertikalnih nosivih elemenata. Na ovaj način želi se doprinijeti inženjerskoj praksi i akademskoj zajednici u svjetlu razumijevanja učinaka međudjelovanja tla i konstrukcija na zahtijevanu duktilnost konstrukcija. S obzirom na to da je u svijetu do danas provedeno vrlo malo eksperimentalnih istraživanja na velikim modelima konstrukcija, doprinijet će se i svjetskoj bazi rezultata eksperimentalnih istraživanja dobivenih na velikim modelima konstrukcija sa svrhom njihovog boljeg razumijevanja i s konačnim ciljem stvaranja sigurnijega i pouzdanijeg okruženja za život ljudi u potresno aktivnim područjima. Također, želja je doprinijeti poboljšanju europskih normiranih spektralnih funkcija za meka tla kako bi uključivale učinke međudjelovanja tla i konstrukcija, što bi doprinijelo projektiranju sigurnijih i pouzdanijih konstrukcija otpornih na potrese. Ovaj bi segment istraživanja ujedno bio i nastavak nedavnih istraživanja provedenih na Građevinskom fakultetu u Osijeku, objedinjenih u doktorskoj disertaciji Ivana Krausa (2014) [3]. Nadalje, istražiti će se mogućnosti uključivanja popustljivosti temeljnog tla u europsku nelinearnu statičku metodu N2 i predložiti algoritam i metodologiju za uključivanje učinaka međudjelovanja tla i konstrukcija u spomenutu metodu te na taj način izmijeniti pristup inženjerske prakse u načinu proračuna konstrukcija.

## 2 Postojeća eksperimentalna istraživanja

Do danas su velike površine potresno aktivnih područja prekrivene konstrukcijama projektiranim primjenom (danas) zastarjelih i prekomjerno konzervativnih normi te nerijetko uz pretpostavku da se konstrukcija može smatrati upetom u nedeformabilnu podlogu, što, jasno, ne odgovara stvarnosti.

Metoda N2 primjenu nalazi u proračunima zgrada na izolatorima [12-14], pri čemu je poznato da se numerički modeli naprava za potresnu izolaciju konstrukcija [15] i numerički modeli za tlo, definirani kao set opruga-prigušivač [16], [17], temelje na istoj koncepciji. Iz toga se može zaključiti da postoji izražen potencijal za uključivanjem popustljivosti temeljnoga tla u proračune primjenom metode N2. Ako se promatraju dvije iste zgrade, od kojih je jedna položena na meko temeljno tlo, a druga smještena na izolatoru, može se reći da obje zgrade predominantno osciliraju u (gotovo istom) prvom obliku, budući da se u oba slučaja na popustljivom mediju nalazi relativno kruti blok. Ovo je važna pretpostavka koja ide u prilog sprezanju metode N2 i popustljivosti temeljne podloge. Na ovakvoj pretpostavci su i Kilar i Koren [12] pokazali primjenu metode N2 u proračunu zgrada na izolatorima, što je istraženo samo u svjetlu proračuna u računalnim programima.

Nadalje, rezultati istraživanja provedenoga u geotehničkoj centrifugi na Sveučilištu Davis [18] pokazuju dobro slaganje ovojnice moment - kut prevrtanja dobivene dinamičkim ispitivanjem i petlje moment savijanja - kut nagiba dobiven iz ispitivanja horizontalnim cikličkim opterećenjem i rasterećenjem na istom modelu (slika 1.). Ovaj rezultat je važan, jer potvrđuje da su ispitivanja postupnim horizontalnim opterećivanjem i rasterećivanjem prikladna za opisivanje dinamičkog ponašanja konstrukcija. Također, s ovime na umu može se zaključiti da ispitivanja na fizičkim modelima konstrukcija opterećenima na horizontalno cikličko opterećivanje i rasterećivanje mogu dati dobre rezultate za kalibraciju i validaciju numeričkih modela koji se ispituju na dinamičko podrhtavanje podloge.



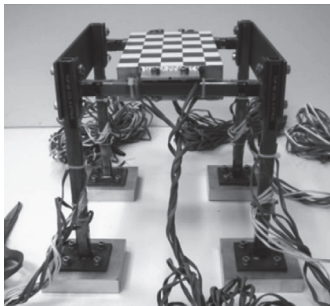
Slika 1. Usporedba odziva modela konstrukcije pri dinamičkoj pobudi te pri horizontalnom opterećivanju i rasterećivanju [18]

U tablici 1. dan je opis eksperimenata provedenih s ciljem istraživanja nelinearnog ponašanja plitko temeljenih konstrukcija.

Tablica 1. Lista s opisom eksperimenata provedenih u svijetu s ciljem istraživanja u području međudjelovanja tla i konstrukcija

Izvor	Mjerilo	Okruženje u kojem je provedeno ispitivanje	Model konstrukcije	Pobuda	Nedostatci
Negro et al., 2000 [19]	1:1	Kruta, vodonepropusna betonska kutija 4,6 x 4,6 x 4 m ispunjena zasićenim pijeskom relativne zbijenosti 85 % i 45 %	Temeljna stopa 1 x 1 m s kratkim stupom preko kojeg se u model unosi horizontalno opterećenje i moment prevrtanja	Horizontalni hidraulični pobuđivač	Model sadrži samo dio konstrukcije: krutu temeljnu stopu i dio stupa koji nema sposobnost plastifikacije
Combesure i Chaudat, 2000 [20]	1:3	Kruta kutija dimenzija 4x4x0,4 m pričvršćena za potresni stol	Dva međusobno povezana posmična zida na trakastim temeljima dimenzija 2,1 x 0,8 m	Potresni stol	Model sadrži dva međusobno povezana kruta posmična zida koji se na tlu ponašaju kao kruti blok
Pitilakis, 2006 [21]	1:1	Teren, uslojeno sedimentno tlo sa srednjom brzinom širenja posmičnih valova od 330 m/s	Model konstrukcije s četiri čelična stupa pričvršćena za temelj kvadratnog tlocrta (4x4 m), visine približno 3,8 m, koji na temeljno tlo stvara pritisak od približno 25 kPa	Ambijentalne vibracije i podrhtavanje tla, metoda horizontalnog povlačenja i naglog otpuštanja te generator vibracija	Model konstrukcije nema sposobnost plastifikacije
Anastasopoulos, 2010 [22]	1:50	Posmična kutija ispunjena pijeskom relativne zbijenosti od 85 %	Obrnuto njihalo upeto u kvadratnu temeljnu stopu. Stupu obrnutog njihala je omogućena plastifikacija	Potresni stol	Vrlo mala razina naprežanja u tlu od vlastite težine tla i modela konstrukcije. Vrlo mali model konstrukcije.
Anastasopoulos et al., 2012 [23]	1:40	Kruta kutija dužine 1,60 m s ugrađenim pijeskom debljine 45 cm. Ispitivanje je provedeno koristeći jednoliki te uslojeni pijesak relativne zbijenosti od 45 do 93 %.	Obrnuto njihalo upeto u kvadratnu temeljnu stopu 15 x 15 cm. Omjer visine težišta mase modela i širine temelja u smjeru djelovanja horizontalne pobude je 3:1. Na donju pluhu temelja je nalijepljen brusni papir koji osigurava trenje od približno 70 %.	Horizontalni hidraulični pobuđivač	Vrlo mala razina naprežanja u tlu od vlastite težine tla i modela konstrukcije. Model konstrukcije nema mogućnost plastifikacije.
Pender et al., 2013 [24]	1:1	Teren, čvrsto kohezivno tlo	Čelična okvirna konstrukcija širine 2 m, visine 3,5 m i dužine 6 m pričvršćena za dva trakasta temelja dimenzija 2x0,4 m	Metoda horizontalnog povlačenja i naglog otpuštanja	Model konstrukcije nema sposobnost plastifikacije
Givens, 2013 [25]	1:1	Teren, pjeskoviti riječni nanosi debljine 18 m iznad trošne granitne stijene	Čelična okvirna konstrukcija sa spregovima i plitkim pravokutnim temeljem (0,6 x 4,3 x 2,1 m) ukupne visine 3 m, koja na temeljno tlo stvara pritisak od približno 23 kPa	Ambijentalne vibracije i podrhtavanje tla te generator vibracija	Model konstrukcije nema sposobnost plastifikacije
Mason et al., 2013 [26]	1:55	Posmična kutija (90,9 x 43,4 x 29,5 m, u mjerilu prototipa) ispunjena suhim pijeskom s relativnom zbijenošću od 80 %	Modeli konstrukcija visine jednog i tri kata. Oba modela su izrađena od aluminija i čelika. Niža konstrukcija je temeljena na nepovezanim temeljnim stopama i visine je 12,4 m, dok viša konstrukcija ima podrum, a iznad razine temeljnog tla je ukupne visine 34,8 m (u mjerilu prototipa)	Geotehnička centrifuga	Mali model konstrukcije, što rezultira nepraktičnošću mjerenja deformacija oko mjesta plastifikacije stupa. Temeljne stope su ne povezane, što se kosi s načelima projektiranja prema Eurocode normama

Veliki modeli konstrukcija, dani u tablici 1., imaju nosive vertikalne elemente koji ostaju u elastičnom području za cijelo vrijeme ispitivanja. Drugačije rečeno, svi ovi modeli ne opisuju plastično ponašanje nosivoga sustava i ne daju uvid u utjecaj popustljivosti temeljnog tla na zahtijevanu duktilnost. S druge strane, modeli koje su ispitali Mason i suradnici [26] izrađeni su u vrlo malom mjerilu, gdje su krajevi greda te kraj stupa na spoju s temeljem oslabljeni kako bi se omogućilo simuliranje plastičnih zglobova (slika 2).



Slika 2. Model konstrukcije ispitan u geotehničkoj centrifugi na Sveučilištu Davis [26]

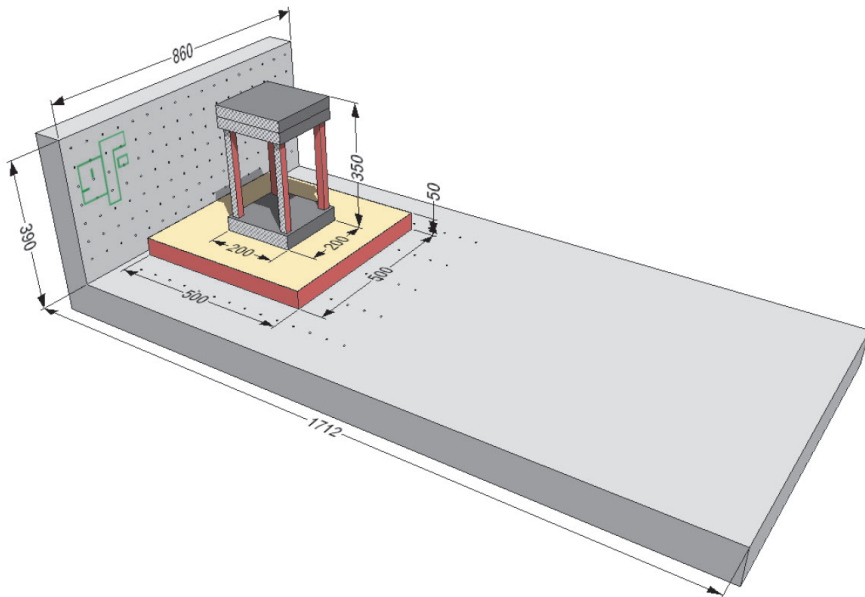
Iako su modeli ispitani u geotehničkoj centrifugi vrlo vrijedni s obzirom na ponuđene rezultate, zbog vrlo malog mjerila poželjno je usporediti ih s modelima u većem mjerilu (veći modeli omogućavaju ugradnju više instrumenata za mjerenje deformacija i pomaka, a time i detaljnije rezultate mjerenja). Između ostalog, zbog maloga mjerila modela ispitanih u geotehničkoj centrifugi na Sveučilištu Davis, velik broj uređaja te kabela pričvršćenih na model može utjecati na ponašanje modela, pri čemu valja imati na umu da pri takvim ispitivanjima centrifugalne sile djeluju jednako na model konstrukcije kao i na uređaje i kabele pričvršćene na nju (drugačije rečeno, povećavaju im masu, između ostalog). Osim toga, opisani modeli konstrukcija ispitani u geotehničkoj centrifugi sadrže nepovezane temeljne stope, što se protivi načelima oblikovanja konstrukcija u potresnim područjima prema europskim propisima. Stoga slijedi kako postoji potreba za ispitivanjem plitko temeljenih konstrukcija na mekim tlima koje se sastoje od pločastih temelja (ili temeljnih stopa povezanih veznim gredama) sa stupovima (i gredama) kojima je omogućena plastifikacija pri djelovanju horizontalnoga opterećenja, što je jedan od ciljeva istraživanja u okviru ovog doktorskog rada.

U sklopu znanstveno-istraživačkog projekta PENDULARUM (15-04), na Građevinskom fakultetu Osijek provest će se eksperimentalno istraživanje primjenjujući reaktivni zid i reaktivnu ploču kao osnovnu platformu za ispitivanje (slika 3.). Reaktivni zid je dugačak 860 cm, a visok 390 cm, debljina reaktivnog zida iznosi 80 cm. Reaktivna ploča ima debljinu od 100 cm, a tlocrtnih je dimenzija 1712 x 860 cm (slika 4.). Najmanja visina prostorije iznosi 658 cm (stropna ploča je kosa).



Slika 3. Laboratorij u novoj zgradi Građevinskog fakulteta u Osijeku s prikazom reaktivne ploče i reaktivnog zida

Prije izrade modela konstrukcije i pripreme podloge od pijeska na kojem će se konstrukcija temeljiti, izradit će se jednostavan uređaj/sito za rasprostiranje pijeska (engl. pluviator ili sand raining system) uz postizanje željene relativne gustoće, tj. zbijenosti. Uređaj bi sadržavao čeličnu posudu kojoj je omogućeno pomicanje po visini i horizontalno, koja bi na dnu imala podesivi otvor. Otvor s donje strane uređaja omogućava fino zatvaranje i otvaranje, što dopušta reguliranje brzine i količine istjecanja pijeska, a time i relativnu zbijenost pijeska koji simulira temeljno tlo.



Slika 4. Model sustava tlo-konstrukcija u okruženju reaktivnog zida i reaktivne ploče na Građevinskom fakultetu Osijek (dimenzije u cm)

U okviru istraživanja planirano je provesti 12 različitih ispitivanja sustava tlo-konstrukcija. Svaki model će prvo biti ispitan na djelovanje vibracija unesenih preko generatora vibracija pričvršćenog za stropnu ploču, nakon čega će se ispitivati do sloma metodom horizontalnog guranja pomoću hidraulične preše pričvršćene za reaktivni zid. Svi će modeli konstrukcija imati isti temelj, isti osnovni period osciliranja te iste stupove s istim oslabljenjima u području očekivanog nastanka plastičnih zglobova (na gornjem i donjem kraju stupa). Osnovni period osciliranja modela konstrukcija bit će oko 0,40 s obzirom da je dobro poznato kako učinci međudjelovanja tla i konstrukcija imaju vrlo izražen utjecaj na takve konstrukcije. Oslabljenja čeličnih stupova bit će projektirana tako da dobro opisuju potencijalne plastične zglobove armiranobetonskih stupova, projektirane sukladno inženjerskoj praksi i u skladu s europskim normama.

Metodologija eksperimenta sastojat će se od sljedećih koraka. Prvi korak podrazumijeva upoznavanje s problemom te uključuje detaljan pregled literature pretežito izdane u posljednjih 3 do 5 godina. Cilj pregleda literature je utvrditi trenutno stanje u području istraživanja te prikupiti dodatne informacije vezane za odabir parametara za provedbu istraživanja. Korak koji slijedi je provedba preliminarnih istraživanja u nekom od računalnih programa. Na temelju studije provedene uz primjenu računalnih programa konačno će se definirati konstrukcije koje će se ispitivati eksperimentalno radi provjere valjanosti numeričkih modela te kasnije radi potvrde valjanosti rezultata parametarske studije. Prije izrade modela konstrukcije i pripreme kreveta od pijeska na kojem će se konstrukcija temeljiti, izradit će se sito za rasprostiranje pijeska uz postizanje željene relativne gustoće. Slijedi provođenje eksperimenta. Modeli konstrukcije, u upetom stanju i stanju kada se promatraju kao slobodno položeni na krevet od pijeska, bit će ispitani na djelovanje horizontalnog guranja pomoću preše. Osim toga, model konstrukcije će se u oba spomenuta stanja temeljenja ispitati na djelovanje prinudnih vibracija koje će se u model unijeti preko pobuđivača pričvršćenoga na stropnoj ploči modela. Cilj je po završetku eksperimenta rezultate istraživanja ugraditi u nove ili postojeće europske norme. Za očekivati je da bi primjena bila široka, budući da je većina konstrukcija temeljena na mekom tlu, umjesto na stijeni.

## Zaključak

Opća i dobro prihvaćena metoda N2 pojednostavnjuje brojne probleme proračuna konstrukcija u inženjerskoj praksi. Iako je koristan i, trenutno, dovoljno precizan alat, postoji potreba za proračunom konstrukcija prema očekivanom odzivu uz učinke međudjelovanja konstrukcije i tla, budući da većina konstrukcija nije temeljena na čvrstoj stijeni i ne može se smatrati upetima u tlo. Konstrukcije su najčešće plitko temeljene na mekim tlima te tijekom horizontalne pobude kliču, ljuljaju se ili čak prevrću. Primjena poboljšane metode N2 moguća je kod proračuna novih i obnove ili prenamjene postojećih konstrukcija. Funkcije impedancije, kao učinkovita zamjena za zahtjevne modele tla, inženjerskoj bi praksi na jednostavan način omogućile uključivanje popustljivosti i svojstvenoga prigušenja tla u proračunima konstrukcija. Također, novijim eksperimentima u velikome mjerilu dopri-

nosi se svjetskoj bazi eksperimenata te se rasvjetljuju pojedini tamni dijelovi suvremenoga shvaćanja proračuna konstrukcija na potresno opterećenje. Nada je da se rezultati dobiveni završetkom eksperimenta mogu ugraditi u nove ili postojeće europske norme. Globalno, istraživanjem se želi podići razina znanja u svjetlu nelinearnoga potresnog ponašanja plitko temeljnih konstrukcija na mekim tlima i na taj način inženjerskoj praksi i akademskoj zajednici doprinijeti novim spoznajama i metodama proračuna.

## Zahvala

Autori zahvaljuju doc.dr.sc. Ivanu Krausu na pomoći oko osmišljavanja provedbe ispitivanja za potrebe izrade doktorskog rada.

## Literatura

- [1] Čaušević, M., Zehentner, E.: Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1:2004, *Građevinar*, 59 (2007) 9, pp. 767-777.
- [2] FEMA (Federal Emergency Management Agency), Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures FEMA 440, 2005, Dostupno na: [www.fema.gov](http://www.fema.gov) (21. listopada 2012.)
- [3] Kraus, I.: Spektri potresnog odziva plitko temeljenih konstrukcija na mekim tlima, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Osijek, Sveučilište u Osijeku, Hrvatska, 2014.
- [4] Verbič, B.: Analysis of certain structure-foundation interaction systems, PhD thesis, Rice University, Huston, Texas, USA, 1972.
- [5] Veletsos, A.S., Meek, J.W.: Dynamic behaviour of building-foundation systems, Report no. 20. Department of Civil Engineering, Rice University, Huston, Texas, USA, 1973.
- [6] Avilós, J., Pórez-Rocha, L.E.: Diagrams of effective periods and dumpings of soil-structure systems, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (1999) 8, pp. 711-715.
- [7] Bray, J. et al., Soil-structure interaction on the scale of city block: seismic performance assessment in dense urban environments-project proposal, 2008.
- [8] Sigmund, V., Zlatković, S.: Nedavni veliki potresi i njihovo značenje, *Građevinar*, 52 (2000) 11, pp. 695-703.
- [9] Fardis, M.N.: Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings (based on EN-Eurocode 8), Vol 8, 2009.
- [10] Pender, M.J., Algie, T.B., Storie, L.B.: Salimath, R., Rocking controlled design of shallow foundations, NZSEE Conference, Wellington, New Zealand, 2013.
- [11] Mekki, M., Elachachi, S.M., Breyse, D., Nedjar, D., Zoutat, M.: Soil-structure interaction effects on RC structures within a performance-based earthquake engineering framework, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18 (2014) 8, pp. 945-962.



- [12] Kilar, V., Koren, D.: Usage of simplified N2 method for analysis of base isolated structures, Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40 (2008) 8, pp. 867-886.
- [13] Kilar, V., Koren, D.: Simplified inelastic seismic analysis of base-isolated structures using the N2 method, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 39 (2010) 9, pp. 967-989.
- [14] Koren, D., Kilar, V.: The applicability of the N2 method to the estimation of torsional effects in asymmetric base-isolated buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40 (2011) 8, pp. 867-889.
- [15] Šimunić, Ž., Skender, A.: Viskoelastična svojstva u potresnoj izolaciji, Građevinar, 62 (2010) 9, pp. 793-802.
- [16] Veletsos, A.S., Meek, J.W.: Dynamic behaviour of building-foundation systems, Report No. 20, Department of Civil Engineering, Rice University, Huston, Texas, USA, 1973.
- [17] Towhata, I.: Geotechnical Earthquake Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [18] Gajan, S., Kutter, L.B., Phalen, D.J., Martin, R.G.: Centrifuge modeling of load-deformation behavior of rocking shallow foundation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25 (2005) 7-10, pp. 773-783.
- [19] Negro, P., Paolucci, R., Pedretti, S., Faccioli, A.E.: Large scale soil-structure interaction experiments on sand under cyclic loading, Proceedings of the 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- [20] Combescure, D., Chaudat, T.: ICONS European program seismic tests on R/C walls with uplift: CAMUS IV specimen, ICONS Project, SEMT/EMSI/RT/00-27/4, CEAM Direction des Røacteurs Nucløaires, Døparment de Møchanique et de Technologie, Paris, France, 2000.
- [21] Ptilakakis, D.: Soil-structure interaction modeling using equivalent linear soil behaviour in the substructure method, Phd thesis, LMSS-Mat, Ecole Centrale Paris, France, 2006.
- [22] Anastasopoulos, I.: Beyond conventional capacity design: towards a new design philosophy. In: R.P. Orense, N., Chouw and M.J. Pender, eds., Soil-Foundation-Structure Interaction: selected papers from the International Workshop on Soil-Foundation Structure Interaction (SFSI 09), Auckland, New Zealand, 26-27 November 2009, CRC Press, Boca Raton, pp. 213-220, 2010.
- [23] Anastasopoulos, I.: Rocking response of SDOF system on shallow improved sand: An experimental study, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 40, pp. 15-33, 2012.
- [24] Pender, M.J., Algie, T.B., Storie, L.B., Salimath, R.: Rocking controlled design of shallow foundations, NZSEE Conference, Wellington, New Zealand, 2013.
- [25] Givens, M.J.: Dynamic Soil-Structure Interaction of Instrumented Buildings, PhD thesis. University of California, Los Angeles, SAD, 2013.
- [26] Mason, H.B., Trombetta, N.W., Chen, Z., Bray, J.D., Hutchinson, T.C., Kutter, B.L.: Seismic soil-structure interaction observed in geotechnical centrifuge experiments, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 48, pp. 162-174, 2013.

# Utjecaj otvora na seizmički odziv izvan svoje ravnine armiranobetonskih okvirnih konstrukcija ispunjenih ziđem

Filip Anić<sup>1</sup>, doc.dr.sc. Davorin Penava<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, , Građevinski fakultet Osijek, [filip.anic@gfos.hr](mailto:filip.anic@gfos.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, [davorin.penava@gfos.hr](mailto:davorin.penava@gfos.hr)

## Sažetak

Utjecaj otvora na potresnu ugroženost okvirnih konstrukcija ispunjenih ziđem nije dovoljno razjašnjen. U svrhu utvrđivanja oštećljivosti i seizmičkog odziva u svojoj i izvan svoje ravnine provedena su eksperimentalna ispitivanja na potresnoj platformi armiranobetonske okvirne modelne građevine s ispunskim ziđem s otvorima. Uočeni odziv konstrukcije i oštećljivost odstupali su od očekivanih. S ciljem vjernijeg opisa uočenog seizmičkog odziva u svojoj i okomito na svoju ravninu okvira ispunjenog ziđem s otvorima, razviti će se novi ili poboljšati postojeći pojednostavljeni proračunski modeli.

*Ključne riječi: armiranobetonski okvir, ispunsko ziđe, otvori, seizmički odziv izvan svoje ravnine*

## Influence of openings on out-of-plane seismic response of masonry infilled reinforced concrete frame structures

### Abstract

The influence of openings on seismic response of masonry infilled frames is not covered by structural design codes. A shaking table experimental study was conducted on a reinforced concrete masonry infilled frame structure with openings under seismic action. The out-of-plane seismic behaviour of masonry infilled frame, contrary to current understanding, was observed. The authors describe the research procedure aimed at creating a simplified computational model for the simulation of seismic in- and of out-of-plane behaviour of masonry infilled frames with openings, and take into account different levels of damage.

*Key words: reinforced concrete frame, masonry infill, openings, out-of-plane seismic response*

## 1 Uvod

Pri projektiranju potresne otpornosti armiranobetonskih okvirnih konstrukcija ispunjenih zidom, ispunsko se zide smatra nekonstrukcijskim elementom [1-4]. Odredbe konstrukcijskih normi usmjerene su isključivo na sprječavanje negativnoga utjecaja nearmiranog ispunskog zida, dok se pozitivan utjecaj ne uzima u obzir [5-7]. Ako je ispunsko zide u kontaktu s okvirom, međudjelovanje konstrukcijskog okvira i nekonstrukcijskoga ispunskog zida treba uzeti u obzir pri projektiranju [8]. Utjecaj otvora na potresnu otpornost okvira ispunjenih zidom u svojoj ravnini i okomito na nju nije dovoljno razjašnjen u konstrukcijskim normama [3]. Eksperimentalni rezultati ispitivanja u svojoj ravnini okvira ispunjenih zidom s otvorima pokazuju različit način sloma u odnosu na ispunsko zide bez otvora [9-13]. Djelovanje horizontalne sile uzrokuje posmični slom ispunskog zida po horizontalnim sljubnicama morta s gornje i donje strane otvora, pri čemu se ispunsko zide razlaže na dijelove zida. Dio zida pored otvora postaje put djelovanja tlačne dijagonale i kritični dio ispunskog zida čijim posmičnim slomom nastupa urušavanje ispunskog zida unutar okvira. Pri horizontalnim silama u svojoj ravnini, međudjelovanje okvira i ispunskog zida s otvorima ovisi o vrsti, smještaju i veličini otvora te o postojanju vertikalnih serklaža oko otvora i vrsti zidnih elemenata [14-17]. Primjena šupljih opečnih zidnih elemenata u izvedbi ispunskog zida, nasuprot primjene pune opeke, umanjuje mogućnost pojave posmičnoga sloma stupa okvira, jer se deformiranjem okvira i potiskivanjem ispunskog zida ono zbog male horizontalne tlačne čvrstoće zidnih elemenata tj. nastaje tzv. "efekt jastuka" [13]. Osim toga, posmični slom po horizontalnim sljubnicama morta, zbog prodiranja morta u šupljine zidnog elementa, različit je za zide od punih i šupljih opečnih zidnih elemenata [18, 19]. Pri djelovanju potresa ispunsko se zide najčešće istovremeno pobuđuje u svojoj ravnini i izvan nje. Primjeri određivanja potresne otpornosti ispunskog zida okomito na svoju ravninu kada su već bili prethodno oštećeni djelovanjem u svojoj ravnini dani su u [20, 21]. Bočno opterećenje, koje je u ispitivanjima simulirano tzv. "zračnim jastukom", u stvarnosti je posljedica inercijalnih sila. Stoga se smatra kako je ispunsko zide na višim katovima konstrukcije, gdje je manja izloženost oštećenjima u svojoj ravnini, izloženije oštećenju izvan ravnine [22]. Ispitivanjima je utvrđeno kako prethodno oštećenje ispunskog zida u ravnini gotovo dvostruko smanjuje otpornost zida izvan ravnine, ali i kako zide u ovisnosti o vitkosti ipak zadržava sposobnost preuzimanja bočnog djelovanja. Pretpostavlja se kako ispunsko zide preuzima opterećenje okomito na svoju ravninu lučnim djelovanjem u vertikalnom i horizontalnom smjeru, što ujedno predviđa i norma [2, 4]. Postojeći pojednostavljeni modeli simulacije neelastičnoga ponašanja okvira ispunjenog zidom s otvorima neprikladni su ili nisu u dovoljnoj mjeri točni [23-29], jer ne uzimaju u obzir međuovisnost otpornosti okvira ispunjenih zidom u svojoj ravnini i izvan nje te različita fizička svojstva zidnih elemenata usporedno s naliježućom površinom i okomito na nju (kao mjerodavna prihvaćaju se svojstva okomito na naliježuću površinu). Postojeći modeli koji u obzir uzimaju međuovisnost otpornosti ispunskog zida

u ravnini i izvan nje [20, 30, 31] ne uzimaju u obzir utjecaj otvora niti vrste zidnih elemenata. Stoga je za istraživanja nužna primjena kalibriranih prostornih proračunskih mikro modela kao npr. [32–37], kako bi se vjerodostojno istražio utjecaj otvora na odziv ispunskoga žida pri djelovanju potresa u svojoj ravnini i izvan nje i svladale prepreke u simulaciji seizmičkog odziva ispunskog žida primjenom pojednostavljenih modela, uzimajući pri tome u obzir šuplje opečne zidne elemente i različite razine oštećenosti ispunskog žida [38, 39]. Dodatno, prema [13, 33] utvrđeno je kako se potresna otpornost armiranobetonskog okvira ispunjenoga židem s otvorima ovisi od slučaja do slučaja te da ih nije prikladno razmatrati kao dva odvojena, već kao jedinstveni spregnuti konstrukcijski element tj. kao uokvireno žide.

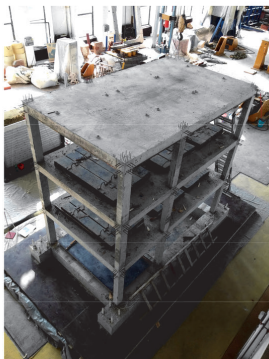
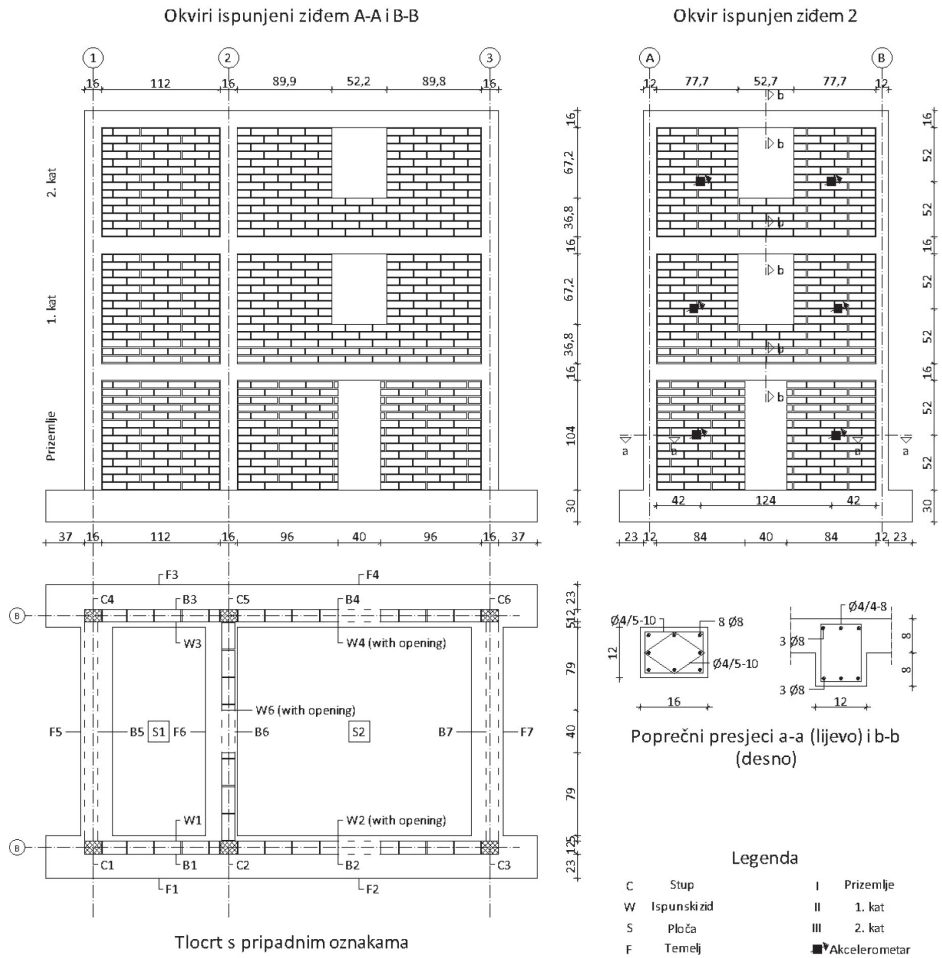
## 2 Svrha i cilj istraživanja

U okviru istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost "FRAME-Masonry Composites for Modelling and Standardization (FRAMA)", koji provodi Građevinski fakultet Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, provedena su eksperimentalna ispitivanja na vibro-platfomi armiranobetonske okvirne modelne građevine s ispunskim židem s otvorima i bez njih pri potresnim djelovanjima (vidjeti sliku 1.) [40, 41]. Modelna građevina izvedena je u mjerilu 1:2,5 prema dimenzijama prikazanim na slici 1. Kako bi se ispunio uvjet modelske sličnosti za masu  $S_M = S_J^2 = 1/2,5^2 = 1/6,25$ , čeličnim je ingotima osigurana dodatna masa modela u iznosu od 4,8 t radi modeliranja inercijalnih sila od vlastite težine konstrukcije.

Modelna građevina sastojala se od tri kata s dva uzdužna okvira (u smjeru seizmičke pobude) i tri poprečna okvira (okomito na smjer seizmičke pobude). Uzdužni okviri i srednji poprečni okvir bili su ispunjeni židem čitavom visinom građevine. Armiranobetonski okviri projektirani su i izvedeni prema odredbama [1, 3] normi te pripadaju razredu srednje duktilnosti s obzirom na izvedbu seizmičkih konstrukcijskih detalja (vidjeti sliku 1.). Ispunsko žide izvedeno je od opečnih zidnih elemenata s vertikalnim šupljinama i morta opće namjene te udovoljava zahtjevima za nearmirano konstrukcijsko žide prema [2, 3]. Svojstva materijala modelne građevine prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Srednje vrijednosti svojstava materijala modelne građevine

Opis svojstva	Vrijednost		Jedinice
Tlačna čvrstoća betonskog valjka	36,6		N/mm <sup>2</sup>
Granica tečenja / vlačna čvrstoća betonskog čelika	Ø 4 mm	753 / 780	N/mm <sup>2</sup>
	Ø 6 mm	564 / 589	
	Ø 8 mm	591 / 621	
Tlačna čvrstoća žida	1,53		N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća žida	0,08		N/mm <sup>2</sup>
Početna posmična čvrstoća žida	0,05		N/mm <sup>2</sup>
Sekantni modul elastičnosti žida	1800		N/mm <sup>2</sup>



Slika 1. Prikaz [42] i dimenzije modelne građevine

Kako geološki uvjeti u seizmičkom području imaju značajnu ulogu u odzivu tla i konstrukcije, odabran je zapis potresa zabilježen u postaji Herceg-Novi tijekom potresa u Crnoj Gori 1979. godine. Zbog modelske sličnosti, vrijeme trajanja seizmičke pobude umanjeno je dijeljenjem sa  $\sqrt{2.5}$ . Ispitivanja su provedena nizom od deset uzastopnih seizmički pobuda različite jakosti s odnosom  $a_g/g = 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,6, 0,7, 0,8, 1,0$  i  $1,2$ . Dodatno, prije ispitivanja i po njegovu završetku, primjenom sinusne pobude s postupnim povećanjem frekvencije, utvrđeni su periodi vibracija građevine. Pri ispitivanjima praćen je seizmički odziv građevine u obliku katnih ubrzanja i horizontalnih pomaka te pojava oštećenja. Dodatno, opažani su dijagonalni pomaci ispunškoga zida prizemlja te ubrzanja ispunškog zida poprečnog okvira. Uočen je način sloma ispunškoga zida s otvorima izvan svoje ravnine suprotan dosada uvriježenim pretpostavkama (vidjeti sliku 2.). Gubitak nosivosti izvan ravnine ispunškoga zida prizemlja nastupio je po vršnoj reški zida u kontaktu s okvirom. Radi procjene potresne otpornosti armiranobetonskih okvirnih konstrukcija s ispunskim zidom s otvorima potreban je pouzdan pojednostavljeni proračunski model za simulaciju seizmičkog odziva u svojoj ravnini i okomito na nju ispunškog zida s otvorima, uzimajući u obzir različite razine oštećenosti prema [43]. Stoga treba povezati rezultate eksperimentalnih ispitivanja modelne armiranobetonske okvirne građevine s ispunskim zidom od šupljih opečnih zidnih elemenata i mikromodele te pojednostavljene proračunske modele, čiji će se odziv uskladiti s odzivom fizičkoga modela.



Slika 2. Slom okomito na svoju ravninu ispunškog zida poprečnog okvira prizemlja

Zidni elementi na stvarnom i proračunskom modelu odgovarat će proizvodnji zidnih elemenata u Hrvatskoj te će na taj način rezultati istraživanja doprinijeti lokalnoj proizvodnji. Na osnovi utvrđenoga odziva proračunskih mikro modela odredit će se krivulje međuovisnosti otpornosti okvira s ispunskim zidom u svojoj ravnini i izvan nje. Utvrdit će se podobnost proračunskih mikromodela te postojećih pojednostavljenih modela za procjenu odziva konstrukcije te će se uvesti novi ili poboljšati postojeći pojednostavljeni modeli, jer do danas nije pronađen prikladan način utvrđivanja odziva ovakvih konstrukcija, osobito pri istovremenoj seizmičkoj pobudi konstrukcije u oba ortogonalna smjera, pri čemu se okvir s ispunskim zidom opterećuje u svojoj ravnini i izvan nje.

Na osnovi dobivenih rezultata pronaći će se smjernice za projektante i izvođače radi poboljšanja otpornosti te povećanja pouzdanosti pri proračunu odziva postojećih i projektiranju novih građevina. Krajnji je cilj utvrditi do koje granice postojanje ispunskog ziđa u armiranobetonskoj okvirnoj konstrukciji doprinosi potresnoj otpornosti okvira i daje korisne (pozitivne) učinke, a kada postaje ometajući element zbog kojega se povećava oštetljivost građevine. Okviri s ispunskim ziđem razmatrat će se kao jedinstveni spregnuti konstrukcijski element "uokvireno ziđe".

### 3 Metode istraživanja

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja modelne armiranobetonske okvirne građevine s ispunskim ziđem od šupljih opečnih zidnih elemenata dostupnih u okviru istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost "Uokvireno ziđe - kompozitni nosivi sustav kod armiranobetonskih zgrada" bit će osnova za uvođenje novog ili poboljšanje postojećega pojednostavljenog modela za simulaciju seizmičkog odziva konstrukcije. Kako bi se ustanovila najbitnija svojstva konstrukcije koja utječu na seizmički odziv konstrukcije u svojoj ravnini i izvan nje, treba provesti studiju osjetljivosti. Za to će se primijeniti prostorni proračunski mikromodeli. Prvo će se provesti detaljna eksperimentalna ispitivanja svojstava ziđa i zidnih elemenata radi dobivanja što pouzdanijih podataka o svojstvima materijala, a zatim će se ti isti eksperimenti simulirati proračunskim mikromodelima, kako bi se prije modeliranja okvira s ispunskim ziđem uklonilo što više nepoznanica. Primjenom prostornih proračunskih mikromodela okvira s ispunskim ziđem [44-46] utvrdit će se razina podudarnosti s eksperimentalnim ispitivanjima pojedinačnih okvira s ispunskim ziđem te mogućnosti usklađivanja proračunskoga i fizičkog modela na osnovi odabranih ključnih svojstava odziva (odnos sile i pomaka, način sloma i raspucavanja). Na prihvaćenom proračunskom mikromodelu utvrdit će se odziv konstrukcije pri istovremenoj seizmičkoj pobudi u oba ortogonalna smjera, pri čemu se uokvireno ziđe opterećuje u svojoj ravnini i izvan nje. U obzir će se uzeti ziđe s otvorima različitih veličina i razmještaja otvora kao npr. prozor ili vrata površine od približno 1,0 do 3,5 m<sup>2</sup>. Utvrdit će se granice tj. vrijednosti katnih pomaka, oštećenosti (raspucavanja) te pojava ugroze stabilnosti konstrukcije pri različitim stanjima oštećenja (neoštećeno - lagano oštećeno - teško oštećeno ali upotrebljivo - teško oštećeno i neupotrebljivo - rušenje). Studijom osjetljivosti odziva konstrukcije u cijelosti te pojedinačnih okvira s ispunskim ziđem pronaći će se najvažnija materijalna i geometrijska svojstva uzimajući u obzir različita stanja oštećenja te će se odrediti krivulje međuovisnosti otpornosti konstrukcijskoga elementa u vlastitoj ravnini i izvan nje. Primjenom računalnoga programa OpenSees [47] provjerit će se podobnost postojećih pojednostavljenih modela za procjenu seizmičkog odziva okvirnih konstrukcij s ispunskim ziđem u svojoj ravnini i izvan nje te će se uvesti novi ili poboljšati postojeći pojednostavljeni modeli.

## 4 Očekivani rezultati

Eksperimentalno i proračunsko istraživanje seizmičkoga odziva u svojoj ravnini i izvan nje armiranobetonske okvirne konstrukcije s ispunskim zidom doprinijet će spoznaji u kojoj se mjeri može uskladiti odziv proračunskih mikromodela u računalnom programu ATENA [48] prema fizičkom modelu, kako bi se nadomjestila zahtjevna eksperimentalna ispitivanja. Utvrdit će se:

- mogućnosti i ograničenja primjene te donijeti smjernice za povećanje pouzdanosti proračunskih mikromodela;
- granice tj. vrijednosti katnih pomaka, oštećenja te pojave ugroze stabilnosti konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata pri različitim stanjima oštećenja (neoštećeno - lagano oštećeno - teško oštećeno ali upotrebljivo - teško oštećeno i neupotrebljivo - rušenje);
- odziv modela pri istovremenoj seizmičkoj pobudi konstrukcije u oba ortogonalna smjera, pri čemu se okvir s ispunskim zidom opterećuje u svojoj ravnini i izvan nje (u obzir će se uzeti zide s otvorima različitih veličina i razmještaja otvora te zida bez otvora).

Studijom osjetljivosti pronaći će se najvažnija materijalna i geometrijska svojstva koja utječu na odziv fizičkoga i proračunskog mikromodela uzimajući u obzir različita stanja oštećenja. Na osnovi utvrđenog odziva proračunskih mikromodela pojedinačnoga uokvirenog zida odredit će se krivulje međuovisnosti otpornosti okvira s ispunskim zidom u svojoj ravnini i izvan nje. Utvrdit će se podobnost postojećih pojednostavljenih modela za procjenu odziva konstrukcija te će se uvesti novi ili poboljšati postojeći pojednostavljeni modeli, primjenom računalnoga programa OpenSees [47].

## 5 Zaključak

Međudjelovanje konstrukcijskoga okvira i nekonstrukcijskog ispunskog zida treba uzeti u obzir pri projektiranju. Utjecaj otvora na potresnu ugroženost okvira ispunjenih zidom nije dovoljno razjašnjen, a osobito do koje granice postojanje ispunskog zida u armiranobetonskoj okvirnoj konstrukciji doprinosi potresnoj otpornosti okvira i daje korisne (pozitivne) učinke, a kada postaje ometajući element zbog kojega se povećava oštetljivost građevine. Primjena rezultata istraživanja prvotno će biti u utvrđivanju odziva većeg broja slučajeva oblikovnih mogućnosti konstrukcije (npr. druge veličine i razmještaj otvora) primjenom kalibriranih proračunskih mikromodela s prethodno utvrđenom točnošću, kako bi se nadomjestila zahtjevna eksperimentalna ispitivanja. Zidni elementi na stvarnom i proračunskom modelu odgovarat će proizvodnji zidnih elemenata u Hrvatskoj te će na taj način rezultati istraživanja doprinijeti lokalnoj proizvodnji. Primjenom računalnoga programa OpenSees provjerit će se podobnost postojećih pojednostavljenih modela za procjenu seizmičkoga odziva u svojoj ravnini



i izvan nje i oštetljivosti okvirnih konstrukcija s ispunskim zidom s otvorima te će se uvesti novi ili poboljšati postojeći pojednostavljeni modeli. Na osnovi dobivenih rezultata pronaći će se smjernice za projektante i izvođače radi poboljšanja nosivih svojstava te povećanja pouzdanosti pri procjeni postojećih i projektiranju novih građevina. Razmotriti će se mogućnost promatranja okvira ispunjenih zidom s otvorima kao jedinstvenog spregnutog konstruktivnog elementa naziva uokvireno zide i njihova svrstavanja u odredbe konstrukcijskih normi [49].

## Zahvale

Prikazani rad upotpunjuje istraživački projekt Hrvatske zaklade za znanost "FRAMe-Masonry Composites for Modelling and Standardization (FRAMA)" te im ovim putem izražavamo zahvalnost na potpori. Autori posebno zahvaljuju sudionicima ovoga projekta koji su pomogli u njegovu ostvarivanju. Pripremi ovoga rada svojim savjetima pomogli su Dr.-Ing. Lars Abrahamczyk (Sveučilište Bauhaus u Weimaru - Njemačka), Dr. Vasilis Sarhosis (Sveučilište Newcastle - UK), Dr.-Ing. Jaime Campbell Barraza (Sveučilište La Serena - Čile) te prof.dr.sc. Ivica Guljaš (Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku) koji je ujedno i voditelj istraživačkog projekta FRAMA.

## Literatura

- [1] CEN. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004). Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [2] CEN. Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures (EN 1996-1-1:2005). Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [3] CEN. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (EN 1998-1:2004). Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [4] Sorić, Z.: Zidane konstrukcije. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [5] Negro, P., Colombo, A.: Irregularities induced by nonstructural masonry panels in framed buildings. Eng Struct [Internet]. 1997 Jul [cited 2015 May 23], 19(7):576-85.
- [6] Hashemi, A., Mosalam, K.M.: Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall. Earthq Eng Struct Dyn [Internet]. 2006 Nov 25 [cited 2015 May 23], 35(14):1827-52. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/eqe.612>
- [7] Klingner, R.E., Rubiano, N., Bashandy, T.R., Sweeney, S.C.: Evaluation of analytical verification of shaking table data from infilled frames. Mason Soc J. 1997, 15(2):33-41.
- [8] Dowrick, D.J.: Earthquake Resistant Design and Risk Reduction. 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd, 2009.

- [9] Asteris, P.G., Kakaletsis, D.J., Chrysostomou, C.Z., Smyrou, E.: Failure modes of in-filled frames. *Electron J Struct Eng.* 2011, 11(1):11-20.
- [10] Kakaletsis, D.J., Karayannis, C.G.: Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading. *J Earthq Eng.* 2008, 12(2):197-221.
- [11] Kakaletsis, D.J., Karayannis, C.G.: Experimental investigation of infilled R/C frames with eccentric openings. *Struct Engineering Mech J.* 2007, 26(231 - 250).
- [12] Kakaletsis, D.J., Karayannis, C.G.: Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings. *ACI Struct J.* 2009, 106(2):132-41.
- [13] Sigmund, V., Penava, D.: Influence of openings, with and without confinement, on cyclic response of infilled r-c frames – an experimental study. *J Earthq Eng.* 2014, 18(November): 113-46.
- [14] Sigmund, V., Penava, D.: Assessment of masonry infilled reinforced concrete frames with openings. *Tech Gaz.* 2013 Jun 15, 20(3):459-66.
- [15] Sigmund, V., Kožar, I., Penava, D.: Shear resistance capacity of framed-walls with openings by structural elements. *Tech Gaz.*
- [16] Penava, D., Radić, I., Gazić, G., Sigmund, V.: Mechanical properties of masonry as required for the seismic resistance verification. *Tech Gaz.* 2011 Jun 27, 18(2):273-80.
- [17] Penava, D.: Utjecaj otvora na seizmičko ponašanje armiranobetonskih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2012.
- [18] Penava, D., Sigmund, V., Kožar, I., Anić, F., Trajber, D., Vig, M.: Clay block masonry and mortar joint interlocking. *Građevinar, rad prihvaćen za publiciranje, kolovoz 2016.*
- [19] Penava, D., Kožar, I.: Utjecaj prodiranja reški morta u šuplje opečne zidne elemente na potresnu otpornost konstrukcijskog zida. In: *Zbornik radova Sedmoga susreta Hrvatskoga društva za mehaniku.* Split: Hrvatsko društvo za mehaniku, 2016. pp. 151-156.
- [20] Angel, R., Abrams, D.P., Shapiro, D., Uzarski, J., Webster, M.: Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign., 1994 Mar.
- [21] Hak, S., Morandi, P., Magenes, G.: Out-of-plane Experimental Response of Strong Masonry Infills. In: *2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.* Istanbul, Turska, 2014.
- [22] ATC. Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings: basic procedures manual (FEMA 306). Redwood City, California, 1998.
- [23] Asteris, P.G., Antoniou, S.T., Sophianopoulos, D.S., Chrysostomou, C.Z.: Mathematical macromodeling of infilled frames: state of the art. *J Struct Eng.* 2011, 137(12):1508-17.

- [24] Asteris, P.G., Cavaleri, L., Di Trapani, F., Sarhosis, V.: A macro-modelling approach for the analysis of infilled frame structures considering the effects of openings and vertical loads. *Struct Infrastruct Eng.* 2016 May 3, 12(5):551-66.
- [25] Asteris, P.G., Ioannis, P.G., Chrysostomou, C.Z.: Modeling of infilled frames with openings. *Open Constr Build Technol J.* 2012, 6:81-91.
- [26] Crisafulli, F.J., Carr, A.J., Park, R.: Analytical modelling of infilled frame structures - a general review. *Bull New Zeal Soc Earthq Eng.* 2000, 33(1):30-47.
- [27] Dawe, J.L., Liu, Y., Seah, C.K.: A parametric study of masonry infilled steel frames. *Can J Civ Eng [Internet].* 2001 Feb [cited 2016 Mar 18], 28(1):149-57.
- [28] Mehrabi, A.B., Shing, P.B.: Finite Element Modeling of Masonry-Infilled RC Frames. *J Struct Eng.* 1997 May 1, 123(5):604-13.
- [29] Ellul, F., D'Ayala, D.: Realistic FE models to enable push-over non linear analysis of masonry infilled frames. *Open Constr Build Technol J.* 2012 Oct 31, 6(1):213-35.
- [30] Morandi, P., Hak, S., Magenes, G.: Simplified out-of-plane resistance verification for slender clay masonry infills in RC frames. *XV Convegno ANIDIS - L'INGEGNERIA SISMICA Ital.* 2013,
- [31] Kadysiewski, S., Mosalam, K.M.: *Modeling of Unreinforced Masonry Infill Walls Considering In-Plane and Out-of-Plane Interaction.* Berkeley, 2008.
- [32] Asteris, P.G., Cotsovos, D.M., Chrysostomou, C.Z., Mohebkhah, A., Al-Chaar, G.K.: Mathematical micromodeling of infilled frames: state of the art. *Eng Struct.* 2013,56:1905-21.
- [33] Penava, D., Sigmund, V., Kožar, I.: Use of simplified micro model of framed-walls with openings for evaluation of shear resistance capacity of members. In: Kožar I, Bičanić N, Jelenić G, Čanađija M, editors. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Congress of Croatian Society of Mechanics.* Opatija, Croatia: Croatian Society of Mechanics, 2015. pp. 1-7.
- [34] Penava, D., Sigmund, V., Kožar, I.: Validation of a simplified micromodel for analysis of infilled RC frames exposed to cyclic lateral loads. *Bull Earthq Eng [Internet].* 2016 May 7 [cited 2016 Aug 12], 1-26. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s10518-016-9929-0>
- [35] Penava, D., Sigmund, V., Kožar, I., Anić, F., Trajber, D., Vig, M.: Application of 3D Micro Models for Seismic Resistance Forecast of Framed-Masonry Structures: Preliminary Activities. In: Abrahamczyk L, editor. *Bauhaus Summer School 2015 "Forecast Engineering: From Past Design to Future Decision."* Weimar, Germany: Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, 2015. pp. In press.
- [36] Sarhosis, V., Tsavdaridis, K.D., Giannopoulos, I.: Discrete Element Modelling of Masonry Infilled Steel Frames with Multiple Window Openings Subjected to Lateral Load Variations. *Open Constr Build Technol J.* 2014, 8(1):93-103.

- [37] Campbell, J.: Numerical Model for Nonlinear Analysis of Masonry Walls. Rheinisch - Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2012.
- [38] Abrahamczyk, L., Schwarz, J., Lang, D.H., Leipold, M., Golbs, C., Genes, M.C., et al.: Building monitoring for seismic risk assessment (I): Instrumentation of RC frame structures as a part of the SERAMAR project. In: 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China, 2008.
- [39] Abrahamczyk, L., Schwarz, J.: Qualification of seismic risk studies on the basis of instrumentally verified vulnerability functions for R.C. building types. In: 10th US National Conference on Earthquake Engineering. Anchorage, Alaska, 2014.
- [40] Necevska-Cvetanovska, G., Sendova, V., Apostolska, R.: Frame - Masonry Composites for Modelling and Standardization (Framed-Masonry) Report IZIIS 2015 - 31. Skopje, Macedonia, 2015.
- [41] Sigmund, V.: FRAMED MASONRY COMPOSITES FOR MODELLING AND STANDARDIZATION. Osijek, Croatia, 2014.
- [42] Sigmund, V.: FRAMED-MASONRY COMPOSITES FOR MODELLING AND STANDARDIZATION [Internet]. 2015 [cited 2015 Jan 13]. Available from: <http://framed-masonry.com/>
- [43] Grünthal, G., Musson, R.M.W., Schwarz, J., Stucchi, M.: European macroseismic scale 1998. Luxembourg, 1998.
- [44] Anić, F.: Proračun uokvirenog zida pri opterećenju u i okomito na svoju ravninu. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2015.
- [45] Trajber, D.: Određivanje nosivosti okomito na vlastitu ravninu uokvirenog zida primjenom nelinearnog računalnog 3D modela. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2015.
- [46] Vig, M.: Određivanje nosivosti u svojoj ravnini uokvirenog zida primjenom nelinearnog računalnog 3D modela. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2015.
- [47] McKenna, F., Fenves, G.L., Filippou, F.C., Scott, M., Elgamal, A., Yang, Z., et al.: The open system for earthquake engineering simulation (OpenSees). Berkeley, California, USA: Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), 2015.
- [48] Cervenka Consulting s.r.o. ATENA for Non-Linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures. Prague: Červenka Consulting s.r.o., 2015.
- [49] CEN. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1994-1-1:2004). Brussels: European Committee for Standardization



# Određivanje duljine zaustavnoga puta na modernim kolničkim površinama

Tomislav Dobrica<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Tatjana Rukavina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hrvatske ceste d.o.o., [tomislav.dobrica@hrvatske-ceste.hr](mailto:tomislav.dobrica@hrvatske-ceste.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za prometnice, [rukavina@grad.hr](mailto:rukavina@grad.hr)

## Sažetak

Duljina zaustavnog puta vozila neizostavni je parametar pri projektiranju prometnica, posebno zbog kriterija sigurnosti koji se moraju udovoljiti pri prometovanju vozila na cestama. Čimbenici koji, između ostalih, utječu na duljinu zaustavnoga puta vozila su stanje kolničke površine (vrsta kolničkog zastora, otpor klizanja, tekstura) i brzina kretanja vozila. Poštujući važeće standarde, važno je sagledati sve bitne utjecaje na određivanje duljine zaustavnoga puta. Kao temelj istraživanja potrebno je provesti mjerenja duljine zaustavnoga puta vozila na pokusnim dionicama sa suvremenim kolničkim površinama. U sklopu ovoga rada dan je prikaz dosadašnjih istraživanja s planom, metodologijom i ciljem istraživanja vezanima uz duljinu zaustavnoga puta vozila.

*Ključne riječi: zaustavni put, sigurnost u prometu, svojstva kolničke površine, tekstura, koeficijent otpora klizanja, pokusne dionice*

## Determination of stopping distance on modern pavement surfaces

### Abstract

The vehicle stopping distance is an unavoidable parameter in the design of roads, especially in the light of safety criteria to be met during vehicle traffic on roads. Some of key factors that affect the vehicle stopping distance are the condition of road surface (type of road surfacing, slip resistance, texture) and vehicle speed. While respecting the prevailing standards, it is important to consider all important influences that are relevant to stopping distance. As the very foundation of the research, it is necessary to conduct vehicle stopping distance measurements on test sections characterized by modern pavement surfaces. The vehicle stopping distance is then determined by analysis of the measurement results, taking into account relevant pavement surface properties and dynamics properties of present-day vehicles. An overview of current research, with the plan, methodology and research goals relating to vehicle stopping distance, is also given in the paper.

*Key words: stopping distance, traffic safety, pavement surface properties, texture, slip resistance coefficient, test sections*

## 1 Uvod

Osnovni cilj pri projektiranju cesta osiguranje je udobne i sigurne vožnje, a duljina zaustavnoga puta vozila parametar je koji u prvom redu utječe na komponentu sigurnosti. U određivanju vrijednosti duljine zaustavnoga puta ključnu ulogu ima kolnik, odnosno njegova površinska svojstava, kao što su ravnost, hvatljivost, tekstura, otpor klizanju i dr. S obzirom na teksturu, geometrijski oblik površine kolnika može odstupati od neke idealne ravnine od 0,5 mm (mikrotekstura) do 50 mm (makrotekstura), a čak i do 500 mm (megahrapavost, megatekstura) [1, 2]. Zbog dinamike kretanja vozila i trenja koje se javlja između pneumatika i površine kolnika dolazi do otpora klizanja koji ima smjer protivan kretanju vozila. Ovaj otpor preduvjet je za pokretanje i zaustavljanje, odnosno kočenje vozila. Utjecaj na stanje površine kolnika imaju i vanjski uvjeti kao npr. temperatura (ljet-zima), suho-kiša-snijeg i dr., što upućuje na kompleksnost ovog problema.

Stanje, uvjeti i različiti utjecaji na površini kolnika nisu homogene prirode, pa svaka pojedinačna situacija u nekom vremenskom periodu svojstvena je sama za sebe. Osim stanja kolničke površine na duljinu zaustavnoga puta utjecaj ima i vozilo. Vozne sposobnosti modernih vozila višestruko su nadmašile mogućnosti vozila proizvedenih prije 20 i 30 godina. U gotovo sva današnja vozila ugrađeni su elektronički sustavi kojima upravlja računalo, a kočioni mehanizmi vozila opremljeni su s nekoliko takvih sustava za kontrolu prilikom kočenja. To su: ABS (Antilock Brake System), sustav koji ne dozvoljava blokiranje kotača prilikom nagloga kočenja; EBD (Electronic Brake Distribution), sustav za raspodjelu sile kočenja na prednje i zadnje osovine vozila; TCS (Traction Control System) odnosno ASR (Antriebssschlupfregelung), tzv. "sustav protiv proklizavanja" te ESP (Electronic Stability Program), sustav elektronske stabilnosti koji pomaže vozaču u gotovo svim kritičnim situacijama i ujedinjuje funkcije sustava protiv blokiranja kotača (ABS) i sustava protiv proklizavanja kotača prilikom naglog kretanja (TCS, ASR), čime se značajno poboljšava sigurnost u vožnji [3].

Uz stanje i uvjete na kolničkoj površini te sposobnosti kočionih sistema u vozilima, neizostavan su čimbenik pri određivanju duljine zaustavnoga puta vozila pneumatici na vozilu ("gume" na kotaču automobila). U konfliktnim situacijama u kojima se vozač i vozilo mogu naći, posebno prilikom kočenja u uvjetima mokroga i skliskog kolnika, odabir propisanih pneumatika i njihova kvaliteta mogu spriječiti katastrofalne posljedice. Od mjeseca studenoga 2012. godine na svim pneumaticima treba postojati nova EU oznaka koja olakšava usporedbu u odnosu na prianjanje na mokrim cestama, potrošnju goriva i razinu buke. Zimske gume imaju posebne čimbenike učinkovitosti koji se ne ocjenjuju EU oznakom gume; to je primjerice vuča na ledu, vuča na snijegu i prianjanje po hladnom vremenu.

Neki proizvođači provode pokuse na 50 različitih čimbenika učinkovitosti, a najvažniji su vodljivost na mokrom, vodljivost na suhom, kočenje na suhom, kočenje na mokrom, prianjanje pri skretanju, dugotrajnost, buku u vozilu, akvaplaning i dr. [4].

Okolnosti između stanja površine kolnika i voznih sposobnosti današnjih vozila u proteklih nekoliko godina u velikoj su se mjeri promjerile. Činjenica je da se povećanjem kriterija i standarda te razvojem novih suvremenih tehnologija, materijala i uređaja doprinosi i segmentu sigurnosti u prometu na cestama.

## 2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Odnos stanja između površine kolnika i broja prometnih nezgoda predmet su prvih mjerenja i analiza s gledišta sigurnosti prometa nacestama, a započeta su već u prvoj polovici 20. stoljeća.

Wallman i Åström [5] uspoređuju vrijednosti otpora klizanja na kolničkoj površini s brojem prometnih nezgoda, analizirajući usporednometode i mjerne uređaje za određivanje otpora klizanja na kolniku.

Zaključak studije ukazuje na kompleksnost zbog utjecaja velikoga broja različitih parametara, od uporabe različitih mjernih uređaja, ponašanja i navika vozača, do velikih oscilacija u zimskom i ljetnom periodu, mokrom i suhom kolniku, brzini kretanja vozila i dr. Istraživanja i analize ograničene su zbog nemogućnosti uvažavanja svih mogućih utjecaja u nekom mjerenju.

Tyfour [6] je istraživao različite utjecaje onečišćenja na mokrim kolnicima u odnosu na otpor klizanja i vrstu pneumatika. Rezultati su pokazali da prisutnost oborinskih voda (kiša, snijeg) znatno smanjuje otpor klizanja, kao i da prisutnost ostalih vrsta onečišćenja (čestice prašine, ostaci motornog ulja, sitne čestice istrošenih guma s vozila i dr.) na kolničkoj površini imaju veliki utjecaj na smanjenje tog otpora. Pored navedenoga ustanovio je da područja u zonama semafora imaju znatno manji otpor klizanja nego druge dionice na istoj prometnici.

Studija [7] koju je provela udruga *Cement, concrete & aggregates* iz Australije bavila se mjerenjima otpora klizanja na betonskim voznim kolničkim površinama kojima su bile obuhvaćene ceste, biciklističke staze i pješачke zone. Svrha istraživanja bila je odrediti i usporediti vrijednosti otpora klizanja na različitim tipovima betonskih kolnika te definirati optimalan tip kolnika za različite uvjete. Bitni parametri kojisu uzimani u obzir pri istraživanju bili su utjecaj okoline uključujući stupanj onečišćenja kolničke površine i temperaturu, fizičke osobine materijala (tekstura), starost kolnika, geometrija i dr. Zaključak je studije da tekstura i heterogenost vozne površine kolnika znatno doprinose velični vrijednosti otpora klizanja, ali je svaki pojedini slučaj mjerenja ipak specifičan sam po sebi i u određenoj mjeri ovisi o okolnostima koje u tom trenutku egzistiraju na kolničkoj površini.

Leu i Henry [8] još su 1978. godine istraživali mogućnost izrade modela prema kojem bi se mogla predvidjeti vrijednost otpora klizanja kao funkcija brzine kretanja vozila i teksture površine kolnika. Značajka modela je da jasno odvaja učinke dviju tekstura (mikro i makro teksture) te daje mogućnost dobivanja jedne vrijednosti (npr. otpora klizanja) iz podatka o mjerenju druge vrijednosti (npr. brzina vozila).



Foster [9] 1989. u svom radu predstavlja rezultate istraživanja odnosa između površinske strukture (mikroteksture) kolnika i otpora klizanja. Posebna pozornost posvećena je sagledavanju te definiranju optimalne količine materijala potrebnih za asfaltnu mješavinu.

Mjerenja mikroteksture dobivena su na ispitnim dionicama te dodatnim analizama u laboratoriju, a mjerenja otpora klizanja provedena su uređajem British Pendulum Tester (BPT) na istim ispitnim dionicama.

Istraživanja su pokazala da je tekstura kolnika parametar koji bitno utječe na otpor klizanja, ali upozoravaju na potrebu detaljnijih istraživanja i analiza za donošenje relevantnih zaključaka.

U nastojanju da se razviju i provjere metode za poboljšanje pouzdanosti mjerenja otpora klizanja u uvjetima mokroga kolnika pokrenut je 70-tih godina projekt [10] koji je uključivao prikupljanje informacija o mjernoj opremi i operativnim postupcima, laboratorijskim i terenskim pokusima sa ciljem utvrđivanja utjecaja pojedinih varijabli na mjerenje otpora klizanja. Projekt obuhvaća razvoj preporuka za usklađivanje i objedinjavanje dobivenih rezultata mjerenja, standardizaciju postupaka kalibracije, operativne postupke, obuku operatera te kriterije za utvrđivanje broja ispitnih dionica.

Da bi se rezultati mjerenja mogli objektivno usporediti bitno je ustanoviti stabilne referentne kolničke površine na kojima se mogu vršiti mjerenja. Daljnja istraživanja potrebna su u svrhu definiranja takve kolničke površine.

Vrijednost otpora klizanja na kolničkoj površini izravno utječe na ukupnu vrijednost duljine zaustavnoga puta vozila, ali duljina zaustavnog puta vozila ovisi i o drugim različitim čimbenicima kao što su vrijeme percepcije vozača odnosno vrijeme uočavanja prepreke, vrijeme reakcije vozača, vrijeme reakcije kočionog sistema u vozilu te kočionom kapacitetu vozila, što isto tako ukazuje na složenost i nehomogenost svih mogućih utjecaja u nekoj konkretnoj situaciji na cesti.

Pod pojmom zaustavnoga puta podrazumijeva se put koji vozilo prijeđe od trenutka kad vozač uoči nepomičnu zapreku na putu dotrenutka zaustavljanja vozila kočenjem. Pritom se računa s kočenjem uz korištenje ukupnog iznosa tangencijalnog otpora klizanja između kotača i kolnika [11].

Matematički izraz za izračun duljine zaustavnoga puta "Lz" propisan je Pravilnikom [12]. Parametre koji utječu na duljinu zaustavnoga puta (ujedno i na duljinu potrebne preglednosti) u svojoj su studiji [13] istraživali američki stručnjaci sa sveučilišta u Michiganu 1984. Pokušali su dati odgovor na pitanje koje karakteristike vozila uzeti kao mjerodavne u projektiranju elemenata ceste. Rezultati dobiveni mjerenjem duljine zaustavnoga puta upotrijebljeni su kao podaci za oblikovanje horizontalnih krivina, pregledne duljine pretjecanja, prometnih trakova za spora vozila te prometnih trakova za usporenje i ubrzanje. Godine 2004. W. H. von Loeben [14] s Instituta za ceste i željeznice u Karsruheu na ispitnoj dionici provodi mjerenja duljine zaustavnoga puta i to na više vrsta pneumatika za različite brzine kretanja vozila. Cilj istraživanja bio je istražiti sigurnosne aspekte pri određivanju duljine preglednosti na cestama, a isto tako

analize izmjerenih podataka iskoristiti za usporedbu s važećim njemačkim smjericama (RAS-L) za određivanje duljine zaustavnog puta.

Radi ilustracije, pri brzini kretanja vozila od 50 km/h ukupna duljina zaustavnoga puta iznosi otprilike oko 15 m, dok za brzinu od 100 km/h iznosi otprilike 60 metara. To znači, kad se brzina vozila udvostruči, duljina se zaustavnoga puta učetverostruči [15]. Kloeden, McLean i Glonek [16] u svojem istraživanju analiziraju utjecajne faktore koji definiraju vrijednost duljine zaustavnoga puta: starosnu dob vozača, vrijeme reakcije, brzinu kretanja vozila, usporenje vozila, stanje i sposobnost kočionog sistema uvozilu, stanje i kvalitetu pneumatika, vremenske uvjete, stanje kolničke površine i težinu vozila. Svaki od ovih parametara na različiti način i s različitim intenzitetom utječe na duljinu zaustavnog puta. U dosadašnjim istraživanjima nisu u obzir uzimane činjenice da su danas veliki napori učinjeni u smislu poboljšanja karakteristika materijala koji se ugrađuju u suvremene kolničke površine, da su današnja vozila tehnički i tehnološki mnogo bolja nego prije 20-tak i više godina. Posebice je to vezano uz dinamičke osobine i "ponašanje" vozila prilikom vožnje na cesti. Skoro sva su vozila danas opremljena raznim računalnim sustavima koji omogućuju veću razinu sigurnosti i udobnosti putnika u vožnji. Zbog ovih činjenica postoji opravdani razlog za istraživački rad koji bi rezultirao izradom novog pristupa za određivanje duljine zaustavnoga puta vozila.

### 3 Ciljevi istraživanja

Zbog velikoga tehnološkog pomaka i poboljšanja mogućnosti kočionih sustava vozila, kvalitete i komponenata materijala od kojih se proizvode pneumatici za automobile, te izgradnje modernih asfaltnih kolničkih površina duljina zaustavnoga puta današnjih tehnološki i tehnički unaprijeđenih automobila znatno je kraća.

Cilj je istraživanja odrediti duljinu zaustavnoga puta uzimajući u obzir upravo relevantna površinska svojstva modernih kolnika, uz mjerenja na ispitnim dionicama i s vozilima opremljenima suvremenim kočionim sustavima.

*Hipoteza:* Primjenom stvarnih parametara, dobivenih mjerenjem na pokusnim dionicama s različitim kolničkim površinama i različitim brzinama kretanja vozila, moguće je novelirati izračun realne duljine zaustavnog puta kao temeljne postavke za optimizaciju i određivanje relevantnih horizontalnih i vertikalnih elemenata vođenja trase ceste.

### 4 Metodologija istraživanja

Istraživačke aktivnosti za izradu doktorskog rada provoditi će se na ispitnim dionicama s modernim kolničkim površinama koje sudanas u upotrebi kod nas i u svijetu.

#### Kolnik od asfaltnoga betona - (AC)

*Asfaltni beton*, HRN EN 13108-1 [17], mješavina je s kamenim agregatom eruptivnog porijekla najveće veličine zrna od 0-16 mm za habajuće slojeve i veličine zrna od 0 - 22 mm

za vezne slojeve. Sastoji se od mješavine kamene sitneži, pijeska i kamenoga brašna te bitumena kao veziva, pri čemu je granulometrijski sastav kamene smjese sastavljen po načelu najgušće složenog kamenog materijala tako da u sastavu ostane što manji obujam šupljina. Izrađuje se u asfaltnim bazama i ugrađuje "finišerima".

#### **Kolnik od mikroasfalta - (MA)**

*Mikroasfalti*, EN 12271 [18], pripadaju grupi tankoslojnih asfaltnih presvlaka koje se polažu na asfaltnu ili betonsku podlogu na cestama svih grupa prometnog opterećenja kako bi se poboljšale vozne karakteristike i zaštitilo od prodiranja vode u konstrukciju. Izvodi se "hladnim" postupkom, umješavanjem bitumenske emulzije u kameni materijal.

#### **Kolnik od splitmastiks asfalta - (SMA)**

*Splitmastiks asfalt* (SMA11), HRN EN 13108-5 [19], habajući je sloj izveden od "splitmastiksasfalta", asfaltna mješavina diskontinuiranoga granulometrijskog sastava kamene smjese najveće veličine zrna od 0-11 mm namijenjene izvedbi habajućih slojeva asfaltnog zastora na autocestama i cestama iz grupe vrlo teškog i teškog prometnog opterećenja.

Na svakoj ispitnoj dionici mjerit će se:

- tangencijalni koeficijent otpora s mjernim uređajem – vozilom GRIP TESTER,
- teksture površine kolnika s mjernim uređajem – vozilom LASERSKI PROFILOGRAF,
- za mjerenja stvarne duljine zaustavnog puta upotrijebit će se vozila VW Polo, VW Golf i VW Transporter T4, a podaci će se uzimati za nekoliko različitih brzina kretanja vozila.

Istraživanja će se provesti u tri faze:

*I. Faza:* Prikupljanje, proučavanje, sređivanje te analiza sve dostupne znanstvene i stručne literature koja se bavi predmetnom problematikom. Isto tako, u ovoj će se fazi provesti pregled i sistematizacija dosadašnjih mjerenja i ispitivanja.

*II. Faza:* Mjerenje na ispitnim dionicama i prikupljanje i obrada podataka vezanih za tangencijalni koeficijent otpora klizanja, teksturu površine kolnika, duljinu zaustavnoga puta i usporavanja vozila.

*III. Faza:* Provođenje usporedbe i analize rezultata mjerenja u II. fazi, definiranje odnosa između izmjerenih parametara te određivanje načina određivanja realne duljine zaustavnog puta vozila.

## 5 Prikaz aktivnosti u istraživanju

Shodno metodologiji istraživanja, u sklopu doktorskog rada aktivnosti vezane uz istraživački rad ići će u smjeru:

- Određivanje i definiranje pokusnih dionica na tri prometnice s različitim voznim kolničkim površinama, i to od asfaltbetona (AC), mikroasfalta (MA) i splitmastiksasfalta (SMA).
- Mjerenje i određivanje tangencijalnoga koeficijenta otpora klizanja na svakoj od pokusnih dionica primjenom mjernog uređaja GRIP TESTER tako da se mjerenja provode pojedinačno s brzinama kretanja uređaja od 40 km/h, 60 km/h i 80 km/h.
- Mjerenje i određivanje teksture kolnika na svakoj pojedinoj pokusnoj dionici primjenom mjernog uređaja LASERSKI PROFILOGRAF.
- Mjerenje i određivanje stvarne, realne duljine zaustavnoga puta na svakoj od pokusnih dionica primjenom tri klase vozila: vozilo niže klase – VW Polo, vozilo srednje niže klase – VW Golf i kombi vozilo – VW Caravella. Mjerenja se vrše u uvjetima mokroga kolnika (za vrijeme kišnog perioda) tako da se mjeri zaustavni put svakog pojedinog vozila od početka kočenja do zaustavljanja s ulaznim brzinama od 40 km/h, 60 km/h i 80 km/h.
- Prikupljanje i obrada podataka dobivenih mjerenjem.
- Analiza dobivenih podataka i rezultata, istraživanje međusobnih odnosa i njihove usporedbe s važećim smjernicama i pravilnicima radi definiranja načina za određivanje realne duljine zaustavnog puta vozila.

## 6 Zaključak

Zaključno, primjenom prikazane metodologije i očekivanoga cilja istraživanja očekuje se dobivanje novih spoznaja o utjecaju relevantnih površinskih svojstava modernih kolnika (tekstura, otpor klizanja) i vozno-dinamičkih karakteristika suvremenih automobila (kočioni sustav, pneumatici) na duljinu zaustavnog puta vozila.

Kao nastavak, težnja je stvaranje pretpostavki za definiranje izraza za određivanje duljine zaustavnoga puta vozila na temelju rezultata mjerenja i provedenog istraživanja, kao i mogućnost inoviranja preporuka za izmjenu relevantnih smjernica za projektiranje trase ceste s obzirom na očekivano skraćenje realne duljine zaustavnog puta, uz respektiranje potrebne razine sigurnosti vožnje.

## Literatura

- [1] HRN ISO13473-2:2004:Karakteriziranje teksture kolnika uporabom profila površine 1. dio: Određivanje srednje dubine teksture profila; (ISO 13473-1:1997; EN ISO 13473-1:2004)
- [2] HRN ISO13473-2:2004: Karakteriziranje teksture kolnika uporabom profila površine 2. dio: Nazivlje i temeljni zahtjevi povezani s analizom profila teksture kolnika (ISO13473-2:2002)

- [3] Andrew, J. Day: *Breaking of road vehicles*, Butterworth-Heinemann 2014.
- [4] EU Tire Labeling Regulation 1222/2009: Industry Guideline on tirelabeling to promote the use of fuel efficient and safe tires with low noise levels. November 2011.
- [5] Wallman, C.G., Åström, H.: Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety, A literature review, Swedish National Road and Transport Research Institute, 2001.
- [6] Tyfour, W.R.: Tire Skid Resistance on Contaminated Wet Pavements, JJMIE, Department of Mechanical Engineering. Mu'tah Unversity. Jordan 2009.
- [7] Cement, Concrete & Aggregates Australia: Skid Resistance of Residential Concrete Paving Surfaces, Data sheet, July 2002.
- [8] Leu, M.C., Henry, J.J.: Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed From Pavement Texture Measurement, Transportation Research Board, Washington DC, USA 1978.
- [9] Forster, S.W.: Pavement Microtexture and its Relation To Skid Resistance, Pavement Texture Measurment, Transportation Research Board, Washington DC, USA 1989.
- [10] Meyer, W.E., Hegmon, R.R., Gillespie, T.D.: Locked-Wheel Pavement Skid Tester Correlation and Calibration Techniques, Transportation Research Board, Washington DC, USA 1974.
- [11] Dragčević, V., Korlaet, Ž.: Osnove projektiranja cesta, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [12] Pravilnik o uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa, Narodne novine: 110/2001.
- [13] Olson, P.L., Cleveland, D.E., Fancher, P.S., Schneider, L.W.: Parameters Affecting Stopping Sigh Distance, The University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor, Michigan 1984.
- [14] von Loeben, W.H.: Sicherheitsaspekte bei der Sichteeitenbemessung Kolloquium Für Fortgeschrittene im Straßenwesen, 2004, Karlsruhe
- [15] Transport Research Laboratory, UK, 2007, ' Road Safety Authority, 2007
- [16] Kloeden, C.N., McLean, A.J., Glonek, G.: Reanalysis of travelling speed and the risk of crash involvement in Adelaide South Australia, Report CR 207, ATSB, Canberra 2002.
- [17] HRN EN 13108-1:2007: Bitumenske mješavine, 1. dio Asfaltbeton
- [18] HRN EN 12271:2008: Površinska obrada
- [19] HRN EN 13108-5:2007: Bitumenske mješavine, 5. dio SMA (Stone Mastic Asphalt)

# Optimalna duljina prijelaznoga područja na postojećim prugama

Marko Vajdić<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Stjepan Lakušić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DB Engineering & Consulting GmbH, *Marko.Vajdic@deutschebahn.com*

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za prometnice, *laki@grad.hr*

## Sažetak

Rad obrađuje problem postojanosti postojeće kolosiječne konstrukcije na dijelu neposredno prije i nakon objekta (tzv. prijelazno područje). Ovisno o izmjerenim vrijednostima diferencijalnih slijezanja i diferencijalne krutosti kolosiječne konstrukcije na otvorenom dijelu trase i na objektu, uzimajući u obzir brzinu prometovanja vlakova, određivanjem optimalnoga nagiba linearne promjene navedenih varijabli nastojat će se definirati optimalna duljina prijelaznog područja kojom će se minimizirati pojava dinamičkih pobuda koje uzrokuju degradaciju kolosiječne konstrukcije na tom dijelu.

*Ključne riječi: prijelazna područja, degradacija kolosiječne konstrukcije*

## Optimum length of transition zones on existing railway lines

### Abstract

The problem of stability of the existing track structure on a part immediately before and after a structure (the so called transition zone) is analysed in the paper. Depending on measured differential settlement and differential stiffness values for track structure on an open part of the track and at the structure, and taking into consideration the train speed, an optimal gradient of the linear change of the aforementioned variables will be defined in order to determine an optimum transition-zone length in which the occurrence of dynamic impulses causing track-structure degradation on this part will be minimized.

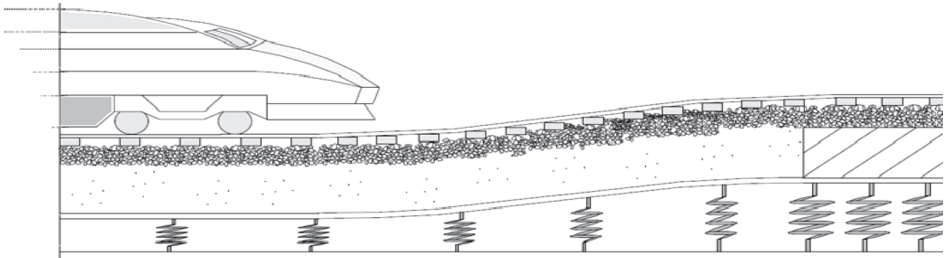
*Key words: transition zone, degradation of the track structure*

## 1 Uvod

Jedan od temeljnih ciljeva današnjih željezničkih uprava smanjenje je troškova namijenjenih održavanju postojeće infrastrukture. Zbog učestale potrebe za održavanjem i saniranjem kolosiječne konstrukcije, koja je nerazmjerna u odnosu na ostale dijelove trase, nekoliko europskih i američkih željezničkih uprava definiralo je prijelazna područja između kolosijeka na otvorenom dijelu trase i objektu (prijelaz s geotehničke na krutu građevinu) kao izrazito problematična mjesta [1]. Učestalom potrebom za saniranjem prijelaznih područja smanjuje se kapacitet pruge i prometni kontinuitet, što željezničkim upravama stvara dodatne troškove. Stoga stručno i kvalitetno izvedena prijelazna područja predstavljaju znatan potencijal za doprinos smanjenju ukupnih troškova namijenjenih održavanju.

## 2 Općenito o prijelaznim područjima

Prijelazna područja definiramo kao dijelove trase na kojima dolazi do promjene osnovnih karakteristika koje definiraju kolosiječnu konstrukciju u cjelini. Pod osnovnim karakteristikama smatra se krutost konstrukcije gornjega i donjeg ustroja, veličina slijeganja pojedinih komponenata kolosiječne konstrukcije i ukupna kumulativna vrijednost slijeganja cjelokupne kolosiječne konstrukcije, geometrija kolosijeka itd. Ukratko, prijelazna područja predstavljaju pojavu uzdužnoga diskontinuiteta u kolosiječnoj konstrukciji [2].



Slika 1. Prijelazno područje - diskontinuitet u kolosiječnoj konstrukciji [2]

Tip prijelaznoga područja ovisi o mjestu na kojem se ono nalazi [3]:

1. prijelaz između različitih sustava gornjega ustroja:
  - prijelaz između klasičnoga sustava gornjeg ustroja sa zastornom prizmom i kolosijeka na čvrstoj podlozi,
  - prijelaz između pragova različitih krutosti i elastičnih svojstava (npr. drvenih i betonskih pragova),
  - na mjestu izoliranih spojeva tračnica,
  - u predjelu skretnica;

2. prijelaz s jedne nosive podloge na drugu:
  - spoj otvorenoga dijela trase i mosta ili vijadukta,
  - spoj otvorenoga dijela trase i tunela,
  - trasa iznad plitko postavljenoga propusta,
  - spoj zemljanih građevina različitih karakteristika;
3. direktan prijelaz s objekta na objekt:
  - iz tunela na most ili vijadukt,
  - spoj dvaju vijadukata međusobno različitih konstrukcija.

## 2.1 Negativni mehanizmi koji se pojavljuju u prijelaznim područjima

Loše stanja prijelaznih područja posljedica je mnogobrojnih složenih i međusobno uzročno–posljedično povezanih mehanizama koji jedan drugoga međusobno uvjetuju. Dosadašnja istraživanja navela su sljedeće negativne mehanizme koji utječu na stabilnost i postojanost prijelaznih područja:

1. variranje krutosti kolosiječne konstrukcije, odnosno njezin diskontinuitet [4-8],
2. pojava diferencijalnih slijeganja kolosiječne konstrukcije [5, 8-13],
3. utjecaj brzine i smjera prometovanja tračničkih vozila [4-8, 14].

Cikličkim ponavljanjem ovih procesa ubrzava se degradacija kolosiječne konstrukcije, a naročito geometrija kolosiječne rešetke, što za direktnu posljedicu ima smanjenje sigurnosti i kvalitete prometovanja tračničkih vozila. Kako bi se pronašlo što kvalitetnije rješenje za ublažavanje negativnih posljedica, treba u obzir uzeti i analizirati sve negativne mehanizme koji utječu na ponašanje kolosiječne konstrukcije. Njihova je identifikacija vrlo kompleksna, pa je način rješavanja problema jedinstven za svaku pojedinu lokaciju.

## 2.2 Zadatak prijelaznih područja

Iza pojma “prijelazno područje” krije se određeno konstrukcijsko rješenje koje treba zadovoljiti u pogledu dopuštenih naprezanja i trajnosti rješenja te, kao krajnji rezultat, sigurnosti i udobnosti prometovanja.

Osnovni zadatak prijelaznih područja je:

- onemogućiti iznenadnu promjenu krutosti nosivih konstrukcijskih elemenata kolosiječne konstrukcije [5, 6, 10, 13-16],
- ublažiti utjecaj diferencijalnih slijeganja na trajnost konstrukcije te sigurnost i udobnost prometovanja tračničkih vozila [5, 11, 13, 15, 17].

U idealnim uvjetima diskontinuitet koji se javlja na dijelu prijelaznog područja ne utječe na sigurnosne aspekte prometovanja tračničkih vozila, već se on najčešće odražava na kvalitetu i udobnost prometovanja te ostale dinamičke pojave [18].



## 2.3 Dosadašnja iskustva željezničkih uprava

Prijelazna područja su kompleksne građevine koje zahtijevaju individualni pristup u projektiranju s obzirom na lokaciju i tip prijelaznoga područja. Različite željezničke uprave na različit način pristupaju rješavanju problema prijelaznih područja. Do sada su predloženi različiti pristupi rješavanju ovoga problema, s naglaskom ili na povećanju krutosti kolosiječne konstrukcije na dijelu prijelaznog područja ili na smanjenju krutosti kolosiječne konstrukcije na dijelu objekta [6]. Pri dimenzioniranju prijelaznih područja najčešće su razmatrane dvije osnovne karakteristike:

- diferencijalna slijeganja,
- diferencijalna krutost kolosijeka [18].

Dimenzioniranje se provodi tako da promjene u slijeganju i krutosti kolosiječne konstrukcije budu postupne, te da zahtjevi za sigurnošću i udobnošću budu zadovoljeni. Jedino linearnom promjenom pojedinih karakteristika dodirnih konstrukcija na razumnoj udaljenosti tako da se jedna diferencijalna promjena raspodijeli na manje korake, dinamički irelevantne intervale, možemo udovoljiti traženim uvjetima u prijelaznom području [2, 3, 6, 16, 18].

## 3 Prijelazno područje između otvorenog dijela trase (geotehničke građevine) i mosta

U sklopu međunarodnog znanstvenoistraživačkog projekta "SMART RAIL" odobrenoga za financiranje unutar 7. okvirnog programa SST.2011.5.2-6. *Cost-effective improvement of rail transport infrastructure* analizirale su se i razrađivale metoda za sanaciju postojeće željezničke infrastrukture radi izrade smjernica koje će omogućiti revitalizaciju dotrajale željezničke infrastrukture u Europi povećavajući time njezinu sigurnost, pouzdanost i učinkovitost [19]. U sklopu trećega radnog paketa obrađena je i problematika prijelaznih područja, s naglaskom na spoj otvorenog dijela trase i mosta, a za pilot projekt odabran je most "Buna" (slika 2.a) [20].



Slika 2. Prikaz mosta "Buna" (lijevo) te vidljiva deformacija geometrije kolosijeka (desno)

Željeznički most "Buna" nalazi se na pruzi M104 Novska–Sisak–Zagreb na km 398+422, a odabran je zbog očitih problema u prijelaznim područjima neposredno prije i nakon samoga mosta (slika 2.b).

### 3.1 Tehničke karakteristike

Promatrana dionica prolazi ravničarskim područjem, nalazi se u pravcu, a uzdužni je nagib 0,02 %. Projektna dokumentacija za ovu dionicu, kao i za sam most, datira još iz 1893. godine kada je ova dionica bila i izgrađena. Pruga je remontirana prvi puta između 1971.–1972. godine, nakon čega se prometovalo dopuštenom brzinom od 60 km/h, a dopuštena masa po osovini bila je 225 kN i 80 kN/m. Nakon remonta pruge Novska–Sisak–Zagreb 2008. godine pruga je osposobljena za dopuštenu osovinsku masu 250 kN i 88 kN/m te dopuštenu brzinu od 160 km/h. S obzirom na postojeće SS uređaje, dopuštena brzina ne može biti veća od 140 km/h. Tim remontom nije bio obuhvaćen most "Buna" te se stoga na tom dijelu vozilo ograničeno s maksimalnom dopuštenom brzinom od 50 km/h. Projekt rekonstrukcije mosta "Buna" izrađen je 2010., a 2013. upotpunjen je, zahvaljujući znanstvenom projektu "SMART RAIL", i rekonstrukcijom prijelaznih područja.

Zatečena postojeća kolosiječna konstrukcija sastojala se od drvenih pragova na osnom razmaku od 60 cm u duljini 50 m prije i nakon mosta "Buna", s krutim kolosiječnim priborom (tip K). Novim je projektom predviđena ugradnja tračnica 60E1 (tvrdoće R 260 N/mm<sup>2</sup>), zavarenih u dugi trak na cijeloj dionici. Drveni pragovi zamijenjeni su novim AB pragovima na osnom razmaku od 60 cm, a kruti kolosiječni pribor zamijenjen je elastičnim (SKL-14). Zastor je izveden od tucanika propisane kvalitete minimalne debljine 30 cm ispod praga.

### 3.2 Prikupljeni podaci o prometu

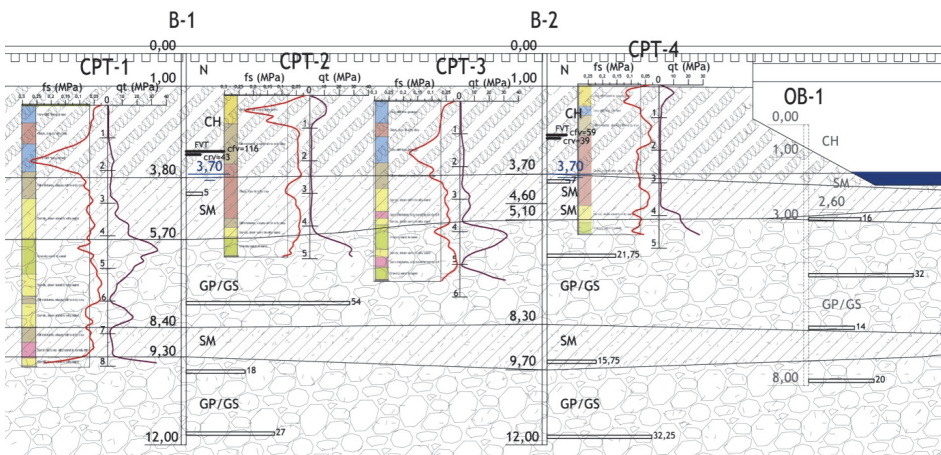
Promatranom dionicom prometuje mješoviti promet: u prosjeku 28 putničkih i 13 teretnih vlakova dnevno, odnosno oko 1 270 827 putnika i 1 554 401 tona tereta godišnje. Tipovi lokomotiva koje prometuju ovom dionicom su: 1141, 2132, 2041 i EMU 6111.

### 3.3 Provedeni geotehnički i geofizički istražni radovi

Opsežni geotehnički i geofizički radovi provedeni su u ožujku 2011. Rezultati terenskih ispitivanja dopunjeni su mnogobrojnim laboratorijskim testiranjima kako bi se dobili što točniji podaci o postojećem stanju. Neki od dobivenih rezultata prikazani su na slici 3. Prema navedenim istražnim radovima na lokaciji je ustanovljen sljedeći sastav temeljnoga tla [21]:

- nasip pruge sastoji se od drobljenog kamenog materijala i šljunka, debljina nasipa je oko 1,0 m;

- do dubine 3,5-3,8 m registriran je sloj visokoplastične gline – CH, srednjegnječivog konzistentnog stanja, anorganske, sivo-plave boje; kod bušotina B3 i B4, do dubine 4,5 m glina je polučvrstog do čvrstog konzistentnog stanja, zeleno sive boje;
- do dubine 4,80-5,70 m, registriran je sloj prašinstoga pijeska – SM, fino do srednje-zrnog, rahlog, sive do tamno smeđe boje; kod bušotine B3 sloj je pretežno prašinst tako da se u tom slučaju radi o visokoplastičnom prahu – MH, lakognječivog konzistentnog stanja, tamno smeđe boje;
- do dubine bušenja, 12 m, registriran je sloj prašinstog, slabo graduiranog šljunka – GP/GS; to je mješavina šljunak-pijesak-prah, zrna su zaobljena, čvrsta, sive boje; kod bušotine B1 između 8,4-9,3 m i kod bušotine B2 između 8,3-9,7 m registriran je džep prašinstoga pijeska – SM, fino do srednje zrnat, čvrst, zeleno-sive boje.



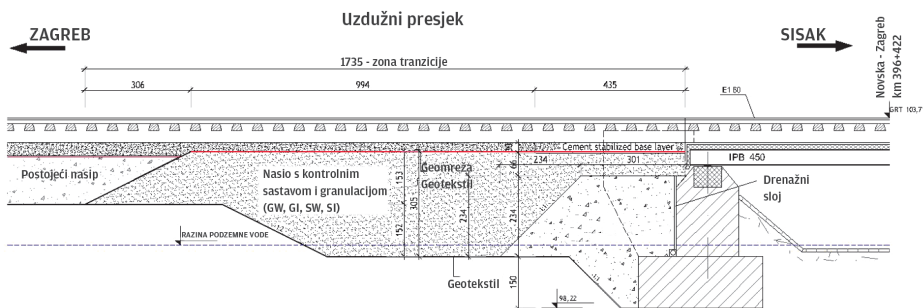
Slika 3. Karakteristike postojeće kolosiječne konstrukcije i temeljnoga tla [21]

S obzirom na dobivene rezultate, slijeganje i loša distribucija prometnog opterećenja kroz kolosiječnu konstrukciju definirani su kao osnovni razlozi degradacije kolosijeka neposredno prije i nakon mosta "Buna".

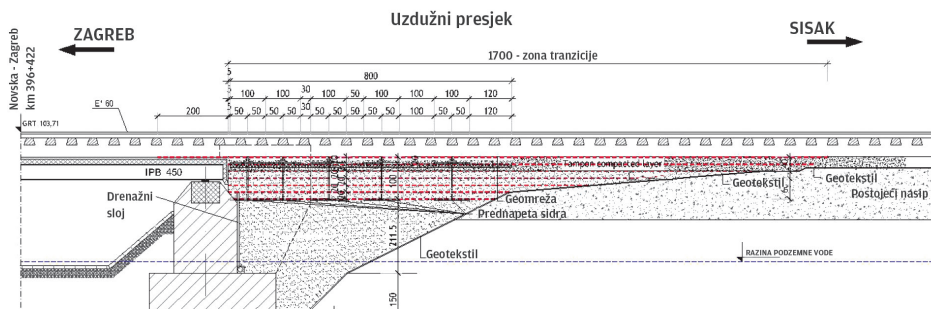
### 3.4 Odabir tehničkog rješenja

U nastojanju da se usporedi više različitih tehničkih rješenja za svaku stranu mosta projektirano je jedinstveno rješenje prijelaznog područja [22]. Prvo rješenje (sa Zagrebačke strane) temeljilo se na dosadašnjim iskustvima željezničkih uprava koja su opisana u uputama "UIC CODE 719R: *Earth works and track bed on railway lines*" [15]. Drugo tehničko rješenje (sa Sisačke strane) predstavlja inovativniji pristup, budući da se za stabilizaciju nasipa rabe prednapeti geosintetici (eng. *geosynthetic reinforced soil* - GRS). Preliminarni proračun utjecaja opterećenja nasipa željezničke pruge, zamjenskih slojeva u prijelaznom području i temeljnoga tla (raspodjela naprezanja u tlu te raspo-

djela deformacija i pomaka) proveden je programima Plaxis 2D ver. 2010.01 i Plaxis 3D Foundation ver. 2.2 (metoda konačnih elemenata). Na temelju dobivenih rezultata sljedeća dva rješenja su finalizirana i izvedena 2013. godine uz manje preinake projektiranog rješenja tijekom same faze izvođenja. Prijelazno područje sa Zagrebačke strane prikazano je na slici 4, dok je prijelazno područje sa Sisačke strane prikazano na slici 5.



Slika 4. Izvedbeni projekt prijelaznog područja sa Zagrebačke strane [20]



Slika 5. Izvedbeni projekt prijelaznog područja sa Sisačke strane [20]

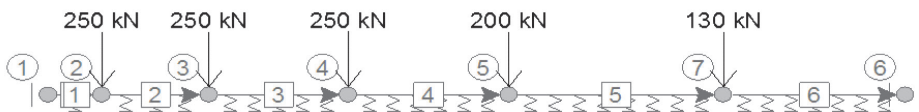
Ono što čini GRS konstrukciju posebnom njezino je predviđeno prednapinjanje na dijelu neposredno nakon rasponske konstrukcije mosta u duljini od 8 metara. 20 sidrenih ploča dimenzija  $0,8 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$ , postavljenih s donje i gornje strane GRS sloja međusobno vertikalno povezane s deset vertikalno postavljenih čeličnih šipki (IBO sidara) promjera 32 mm koja se prednapinju hidrauličkom prešom. Kako bi se izbjegao točkasti utjecaj prednapinjanja, sidrene su ploče s gornje strane međusobno uzdužno povezane s čeličnim U nosačem (profil U 300) kako bi se postigla što bolja distribucija sila prednapinjanja unutar cijelog sloja (slika 5).

Sidra su prednapinjana u skladu sa shemom prikazanom na slici 6. radi postizanja linearno promjenjive krutosti konstrukcije u uzdužnom smjeru. Maksimalna sila prednapinjanja iznosila je 250 kN.



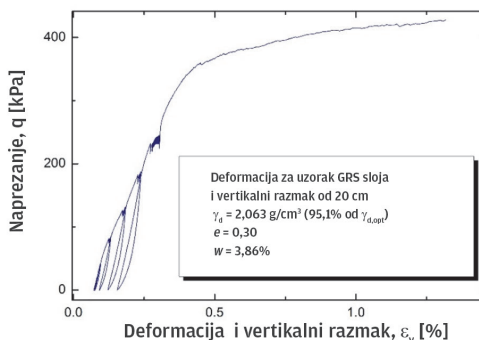
Slika 6. Izvođenje GRS sloja (prednapeti geosintetici)

Određivanje sila prednapinjanja u sidrima i pretpostavljene vrijednosti deformacija GRS sloja zasnivaju se na rezultatima laboratorijskih ispitivanja provedenih u Zavodu za gradbeništvo Slovenije (dr. Stanislav Lenart, 2012.). Ispitivanje i dobivena karakteristična krivulja naprezanje/deformacija prikazani su na slici 7.



Slika 7. Shema prednapinjanja

Iz dobivenih rezultata laboratorijskoga mjerenja može se vidjeti da se krutost uzorka očigledno povećava nakon prednapinjanja, kao u priloženom slučaju kada se uzorak opteretio sa 180 kPa, rasteretio te ponovno opteretio sa 240 kPa, i ponovno rasteretio i opteretio sa 330 kPa, te je na taj način Youngov modul GRS sloja dosegao otprilike  $E = 150$  MPa.



Slika 8 Međusobni odnos naprezanja i deformacija za uzorak GRS sloja i vertikalni razmak od 20 cm

U prijelazna područja ugrađena su dva tipa geosintetika: polimerna geomreža nosiva u 3 smjera (TensarTriAx170) i polimerna mreža nosiva u 1 smjeru (Tensar RE580). Na

zagrebačkoj strani troosna geomreža ugrađena je na uređeni nasip neposredno ispod tamponskog sloja radi bolje distribucije opterećenja. Na sisačkoj strani troosna geomreža ugrađena je u GRS sloj, a jednoosna je mreža ugrađena neposredno iznad sidrenih ploča u uzdužnom smjeru te uz prijelazno područje pokriva i dio mosta.

### 3.5 Monitoring

Tijekom izvođenja radova konstantno je mjeran stupanj zbijenosti kao i kvaliteta ugrađenih materijala. Nakon puštanja pruge u funkciju izvršeno je mjerenje geometrije kolosijeka pomoću mjernih kolica. Tijekom eksploatacije u nekoliko je navrata izvršeno mjerenje deformacija i naprezanja u konstrukciji pomoću ugrađenih tenzometara (ukupno su ugrađena 82 tenzometra) i linearnog varijabilnog transformatora pomaka (LVDT) (mjerenje deformacije pod dinamičkim opterećenjem) te Benkelman greda i vagonskog vozila tipa Kgs definiranoga osovinskog opterećenja (bruto izmjerene težine 38750,00 kg) s lokomotivom (mjerenje deformacije pod statičkim opterećenjem) (slika 9.). Kako bi se motrilo slijeganje nasipa tijekom eksploatacije sa svake strane mosta u nasipu ugrađene su inklinometarske cijevi u poprečnom smjeru.



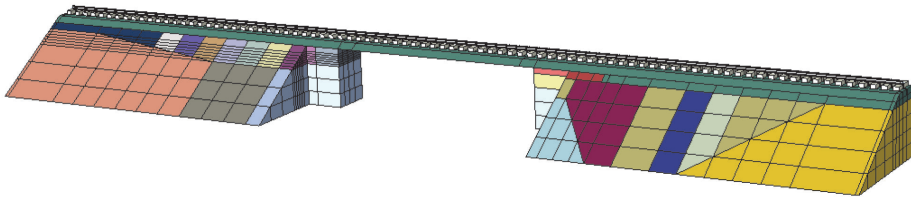
Slika 9. Monitoring tijekom eksploatacije

### 3.6 Izrada modela

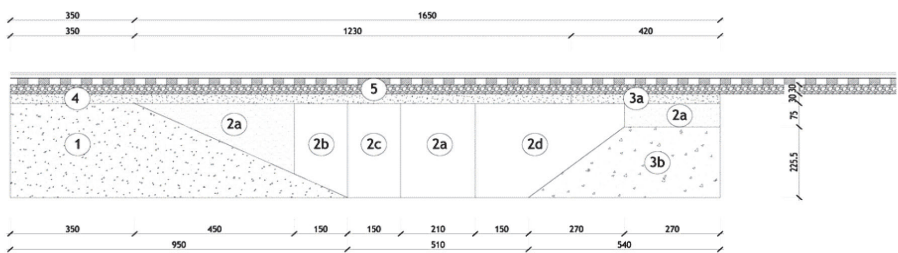
Za izradu trodimenzijskoga modela prijelaznih područja konačnim elementima primijenjen je programski paket ABAQUS. Radi pojednostavljenja modela, isti je izrađen za polovicu konstrukcije (slika 10.).

Prijelazna područja podijeljena su na homogene segmente s jedinstvenim geotehničkim parametrima (Poissonovim koeficijentom, gustoćom i Youngovim modulom elastičnosti).

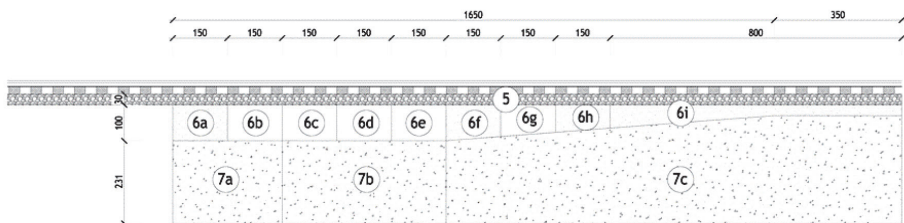
Na slici 11. prikazano je prijelazno područje sa Zagrebačke strane dok je na slici 12. prikazano prijelazno područje sa Sisačke strane. Vrijednosti primijenjenih karakteristika pojedinih komponenata prijelaznoga područja dobivene su mjerenjem na terenu ili u laboratoriju.



Slika 10. Prostorni model



Slika 11. Podjela prijelaznog područja sa zagrebačke strane na pojedine homogene segmente

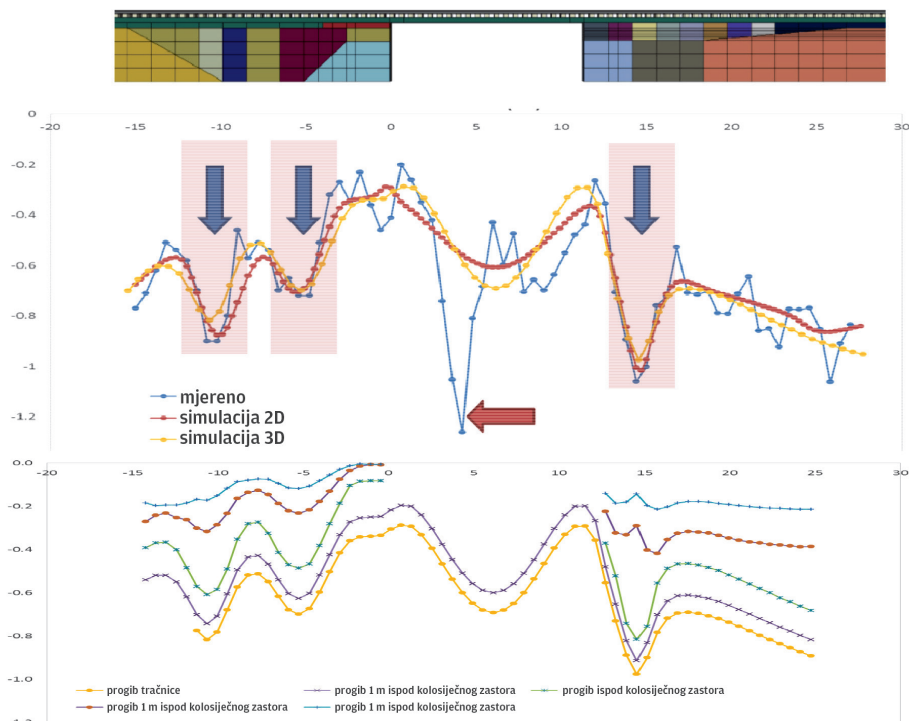


Slika 12. Podjela prijelaznog područja sa sisačke stranena pojedine homogene segmente

### 3.7 Kalibracija modela

Uz primjenu tzv. povratne analize, na temelju poznatih podataka o geotehničkim parametrima izmjenjenim tijekom ili nakon izgradnje samih prijelaznih područja, numeričkim se modeliranjem, uz varijaciju ulaznih podataka unutar prihvatljivih raspona, nastojao poklopiti rezultat analize s mjerenim vrijednostima. U ovom slučaju model se kalibrirao tako da se je Youngov modul elastičnosti svakog pojedinog homogenog segmenta u jednom iteracijskom procesu postupno prilagođavao u prihvatljivim rasponima, tako da dobiveni vertikalni pomaci izmjereni na terenu odgovaraju izračunanim. Na slici

13. može se vidjeti rezultat kalibracije vertikalnih pomaka od statičkog opterećenja. Rezultate analize moguće je vidjeti u tablici 1.



Slika 13. Kalibracija digitalnog atmosferskog modela

Tablica 1. Relativni vertikalni pomaci pojedinih komponenta kolosiječne konstrukcije

Br.	Dio kolosiječne konstrukcije	Vertikalni pomak [mm]			
		Sa zagrebačke strane		Sa sisačke strane	
		Min.	Max.	Min.	Max.
1a)	Kolosiječna rešetka	-0,055	-0,089	-0,053	-0,082
1b)	Zastor	-0,058	-0,169	-0,051	-0,149
1)	Gornji ustroj	-0,113	-0,258	-0,104	-0,231
2a)	Donji ustroj do 1 m dubine	-0,065	-0,290	-0,097	-0,365
2b)	Donji ustroj na dubini između 1 i 2 m	-0,003	-0,142	-0,078	-0,176
2)	Donji ustroj	-0,068	-0,432	-0,175	-0,541
3)	Temeljno tlo	-0,004	-0,188	-0,123	-0,218



Budući da je, kada govorimo o geotehničkim parametrima, svaki slučaj jedinstven, te se zaključci ne mogu univerzalno primjenjivati, korektno definiranje modela omogućuje nam primjenu komparativnih analiza različitih tehničkih rješenja, kao i bolje razumijevanje mehanizama koji se pojavljuju u konstrukciji. Na taj način možemo potvrditi primijenjenu metodologiju u rješavanju određenog problema, povećavajući time vjerojatnost pozitivnoga krajnjeg ishoda. Kalibracija izrađenoga digitalnog modela omogućit će daljnju analizu problematike prijelaznih područja, kao i pronalaženje optimalnog nagiba linearne promjene krutosti kolosiječne konstrukcije koje uzrokuje minimalnu pojavu dinamičkih pobuda.

## 4 Zaključak

Cilj je istraživanja pronalaženje adekvatnoga rješenja kako prijelazna područja ne bi više bila mjesta s učestalom potrebom za održavanjem, odnosno da postojanost konstrukcije u prijelaznom području bude usklađena s ostatkom trase. Određivanjem nagiba linearne promjene krutosti kolosiječne konstrukcije na prijelaznom području između geotehničke građevine i mosta koji uzrokuje minimalnu pojavu dinamičkih pobuda može se definirati duljina potrebnoga prijelaznog područja kojom će se minimizirati degradacija kolosiječne konstrukcije na tom dijelu. Na taj bi se način stekli preduvjeti za izradu potrebnih tehničkih uvjeta za dimenzioniranje i projektiranje prijelaznih područja toga tipa, što do sada u Hrvatskoj nije bila praksa. Iz do sada objavljenih radova na ovu temu može se vidjeti da se većina bavi problemom prijelaznih područja na novim prugama za velike brzine, ne vodeći računa o postojećima koje su već dugi niz godina u eksploataciji, a trpe posljedice novonastalih potreba za što većim kapacitetom, osovinskim opterećenjem i brzinom prometovanja.

## Zahvala

Autori ovog rada zahvaljuju kolegama doc.dr.sc. Stanislavu Lenartu, dr.sc. Mihi Kramarui te doc.dr.sc. Matiji Gamsu iz Zavoda za gradbeništvo Slovenije na pomoći pri izradi prostornog modela prijelaznih područja i njegovoj kalibraciji. Izvedba pokusne dionice, terenska i laboratorijska istraživanja i mjerenja financirana su uz pomoć europskog programa financiranja (7. Okvirnog programa) SST.2011.5.2-6. Cost-effective improvement of rail transport infrastructure.

## Literatura

- [1] Coelho, B.: An assessment of transition zone performance, Rail and Rapid Transit, Vol. 224, Part F, 2010.
- [2] Esveld, C.: Modern Railway Track, Second Edition, TU Delf, 2001.
- [3] Rossmann: RHEDA 2000fi Transitions, Rail One, Brno, 2009.
- [4] Mishra, D., Tutumluer, E., Stark, D.T., Hyslip, P.J., Chrismer, M.S., Tomas, M.: Investigation of differential movement at rail road bridge approach through geotechnical instrumentation, Journal of Zhejiang University, pp. 814-824, 2012.
- [5] Jenks, C.W.: Research Results Digest 79. Washington, 2006.
- [6] Xin, T., Kumar, U., Gao, L.: Dynamic design of track transition between two different slab track, Lulea University of Technology, Strömsund, Švedska, 2011.
- [7] Giannakos, K., Tsoukantas, S.: Transition Zones between Ballastless and Ballasted Track: Influence of changing stiffness on action forces, Transport Research Arena - Europe 2012., Atena, Grčka, 2012.
- [8] Smith, M.E., Bengtsson, P.E., Holm, G.: Three-dimensional analyses of transition zones at railway bridges, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Švedska, 2006.
- [9] Lakušić, S.: Stabilizacija kolosijeka postupkom ljepljenja, Gospodarenje prometnom infrastrukturom, Dani prometnica 2009, pp. 595-615.
- [10] Plotkin, D.: Track Transitions and the Effects of Track Stiffness, TTCI/AAR, 2006.
- [11] Settlement of bridge approaches (The "bump" at the end of the bridge), Transportation research board, Washington D.C., 1993.
- [12] Perić, Z., Popovac, N.: Integralni mostovi, Zagreb, 2010.
- [13] Lichtberger, B.: Track Compendium, Eurailpress, Hamburg, 2005.
- [14] Vertical Elasticity of Ballastless Track, UIC, Pariz, 2008.
- [15] UIC CODE 719R: Earth work sand track bed for railway lines, UIC, Pariz, 2008.
- [16] Berggren, E.: Railway track stiffness - dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance, Stockholm, 2009.
- [17] Lenke, L. R.: Settlement Issues - Bridge Approach Slabs (Final Report Phase I), University of New Mexico, Department of Civil Engineering, New Mexico, 2006.
- [18] Lakušić, S., Vajdić, M.: Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama, GRAĐEVINAR, 63 (2011) 2, pp. 125-134.

- [19] Gavin, K., Stipanović Oslaković, I., Vajdić, M., Puž, G., Sporčić, V.: Smart maintenance and analysis of railway transport infrastructure (SMART RAIL), 2<sup>nd</sup> International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2012.), svibanj 2012., Dubrovnik, pp. 421-428.
- [20] Vajdić, M., Liu, D., Lenart, S., Stipanović Oslaković, I.: Application of different methods for rehabilitation of existing transition zones on the old railway lines, TRA 2014, travanj 2014, Pariz, Francuska
- [21] SMART RAIL Project: Ground investigation report, Report no.: BG-KB/021/12, travanj 2012, Zagreb
- [22] SMART RAIL Project: Izvedbeni projekt prijelaznih područja, A-15252/12, kolovoz 2012, Zagreb

# Oblikovanje cestovnih raskrižja u krivinama

Šime Bezina<sup>1</sup>, doc.dr.sc. Ivica Stančerić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za prometnice, *sbezina@grad.hr*

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za prometnice, *istanceric@grad.hr*

## Sažetak

Raskrižja su mjesta u cestovnoj mreži na kojima se križaju, isprepliću, spajaju ili razdvajaju prometni tokovi. Idealna pozicija za njihov smještaj je u pravcu, ali su zbog specifičnosti lokacije često izgrađena u horizontalnim krivinama. Važeće domaće i strane smjernice i norme daju općenite preporuke za oblikovanje raskrižja u krivinama, koje u praksi rezultiraju nestandardnim i nesigurnim rješenjima. Navedeno upućuje na potrebu za istraživačkim radom. U radu je prikazano stanje područja te ciljevi istraživanja vezani uz oblikovanje raskrižja u krivinama na cestama izvan naselja.

*Ključne riječi: cestovna raskrižja u krivini, oblikovanje raskrižja, mjerodavna vozila, ispitivanje provoznosti, duljina preglednosti, sigurnost*

## Design of road intersections in curves

### Abstract

Intersections are points along the road network in which traffic flows intersect, intertwine, merge, or diverge. They should ideally be positioned in straight line but, due to local particularities, they are often built in horizontal curves. General recommendations for the design of intersections in curves are given in applicable domestic and international guidelines and standards, which in practical terms results in sub-standard and unsafe solutions. This points to the need for undertaking further research. This paper presents the state-of-the-art intersection design methods and research objectives related to the design of intersections in curves on rural roads.

*Key words: road intersections in curves, intersection design, design vehicle, swept path analysis, sight distance, traffic safety*

## 1 Uvod

Sigurnost, nesmetano odvijanje prometa te racionalno korištenje prostora primarni su ciljevi kod projektiranja cesta i cestovnih raskrižja. U pogledu sigurnosti, odvijanje prometa na raskrižjima bitno se razlikuje od odvijanja prometa na otvorenim potezima cestama. Prometne radnje, križanja, isplitanja, uplitanja i preplitanja, čine raskrižja mjestima potencijalno opasnim za nastanak prometnih nesreća [1, 2]. Preporučene mjere za smanjenja prometnih nesreća na raskrižjima obično uključuju: izbor adekvatne lokacije raskrižja, osiguravanje potrebne duljine preglednosti, kanaliziranje prometnih tokova s dodatnim trakovima za skretanje i razdjelnim otocima, rekonstrukciju osi kod nepovoljnih kutova ( $70^\circ < \alpha < 110^\circ$ ) križanja osi cesta, smanjenje brzine vožnje te postavljanje odgovarajućih prometnih znakova i oznaka [1, 2, 3].

Primjeri iz prakse te hrvatskih [4], relevantnih europskih [5, 6, 7] i američkih smjernica [8] pokazuju da je najpovoljnije i najjednostavnije oblikovanje raskrižja kada je os ceste u pravcu te kada se osi cesta sijeku pod pravim kutom. Međutim, u praksi se često susrećemo s raskrižjima u krivinama (slika 1.). Na građevinsko oblikovanje raskrižja osim geometrije kretanja vozila utječe i vozna dinamika. Vozna dinamika na raskrižjima u krivinama bitno se razlikuje od one u pravcu, što znači da je utjecaj brzine vožnje izraženiji te se tome treba posvetiti veća pozornost. Nepridržavanje propisane brzine jedan je od glavnih čimbenika nastanka prometnih nesreća na raskrižjima [9]. Unatoč postavljenim prometnim znakovima vozači ponekad voze brzinom većom od dopuštene. Radi smanjenja brzine na prilazima raskrižju osim građevinskih zahvata primjenjuje se horizontalna i vertikalna signalizacija. Istražuju se novi oblici horizontalne signalizacije i vertikalnih zapreka uz ceste, a učinkovitost ovakvih mjera ispituje se pomoću simulatora vožnje [10, 11]. Zajedničko im je da kod vozača izazivaju osjećaj nelagode, vizualno sužavajući širinu prometnog traka ili ostavljaju dojam da se vozilo kreće brzinom većom od stvarne, što za posljedicu ima smanjenje brzine vožnje.

Za probleme vezane uz oblikovanje raskrižja u krivinama nude se općenita rješenja bez detaljnog opisa [4]. U pravilu se preporuča rekonstrukcija osi ceste ako nije u pravcu. Rekonstrukcija osi u praksi često nije moguća zbog sve veće izgrađenosti uz cestu te zbog prostornih ograničenja, a dodatni nedostatak je i to što rekonstrukcija za sobom uglavnom povlači otkupe zemljišta čime se cijeli projekt dodatno poskupljuje. Sustavna istraživanja vezana za oblikovanje klasičnih trokrakih i četverokrakih čvorišta u razini vrlo su rijetka [12, 13]. Istraživanja se uglavnom odnose na oblikovanje pojedinačnih elemenata presjeka, kao što je primjerice oblikovanje desnog ruba kolnika [14], oblikovanje dodatnog traka za lijevo skretanje [15] te oblikovanje traka za desno skretanje [16]. Ovakvo stanje područja upućuje na potrebu za istraživačkim radom.

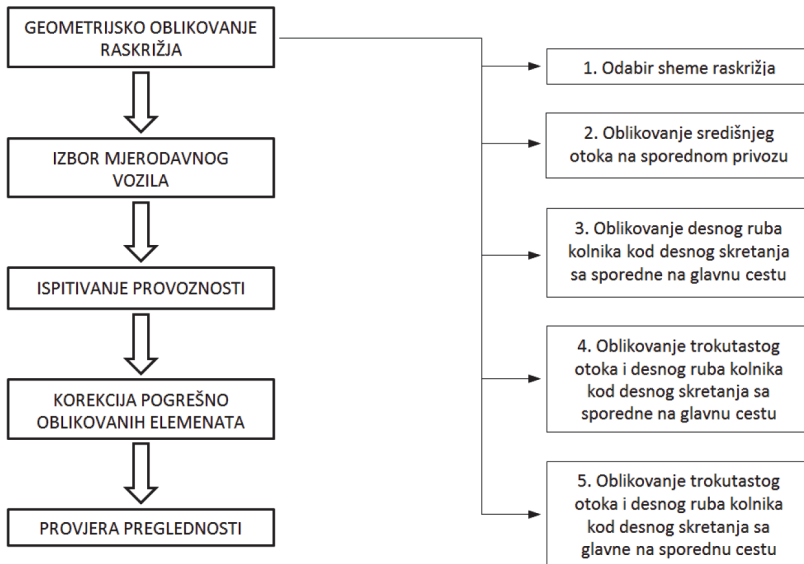


Slika 1. Raskrižja u krivini, primjeri iz Hrvatske (Izvor: [www.google.hr/maps](http://www.google.hr/maps))

## 2 Oblikovanje raskrižja

Glavni parametri koji utječu na oblikovanje raskrižja su: kategorija cesta koje se sijeku, prometno opterećenje, projektna brzina, struktura vozila (mjerodavno vozilo) i geometrija kretanja vozila. Na osnovi prometnoga opterećenja odabire se broj i raspored prometnih trakova, na osnovi projektne brzine širina trakova, dok se na osnovi mjerodavnoga vozila (geometrije kretanja vozila) vrši oblikovanje elemenata raskrižja. Raskrižja se u pravilu oblikuju prema važećim smjernicama ili normama. Uobičajeni postupak shematski je prikazan na slici 2. Nakon geometrijskog oblikovanja pristupa se ispitivanju provoznosti i provjeri preglednosti. Ako navedeni uvjeti nisu ispunjeni, treba, primjenom iteracijskoga postupka, korigirati elemente početnog oblikovanja. Ovim postupkom oblikovanja kao dobro rješenje prihvaća se ono koje zadovoljava uvjete provoznosti mjerodavnoga vozila i duljine preglednosti; pritom se u obzir ne uzima mogućnost predimenzioniranosti elemenata raskrižja. Predimenzioniranost se negativno odražava na zauzetost okolnoga prostora i nedovoljne kanaliziranosti prometnih tokova. S obzirom na to da su u smjernicama i normama [4–8] uglavnom dane općenite preporuke za oblikovanje raskrižja u pravcu, njihova primjena kod oblikovanju raskrižja u krivini zbog složenosti geometrije traži veći broj iteracija. Osim toga elementi oblikovanja raskrižja (rubovi kolnika, širine trakova, dodatni trakovi za lijevo i desno skretanje, razmicanje trakova) definirani su za tipska rješenja s kutom sjecišta osi privoza od  $90^\circ$ . Zbog toga u praksi dolazi do neujednačenih projektnih rješenja i primjeni nestandardiziranih elemenata oblikovanja ne uvažavajući specifičnost lokacije. Sve navedeno upućuje na potrebu za izradom detaljnih uputa i

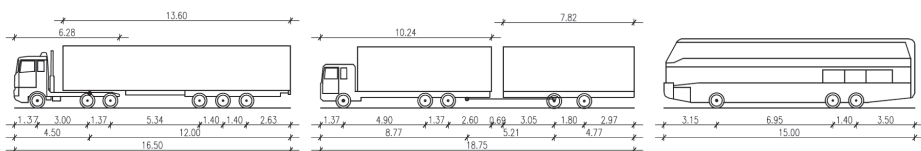
promjenu pristupa u kojem će geometrija kretanja vozila biti polazište za oblikovanje elemenata raskrižja, a ne tek osnova za provjeru provoznosti na oblikovanom raskrižju. Takav pristup trebao bi rezultirati optimalnim oblikovanjem raskrižja u krivini u pogledu iskorištenosti prostora i provoznosti.



Slika 2. Postupak oblikovanja raskrižja

## 2.1 Izbor mjerodavnoga vozila

Elementi raskrižja moraju osigurati nesmetan prolaz mjerodavnoga vozila kroz raskrižje. Trajektorija kretanja mjerodavnoga vozila najznačajniji je parametar geometrijskog oblikovanja raskrižja. Izbor mjerodavnoga vozila treba temeljiti na strukturi prometnog toka, koja ovisi o položaju raskrižja u cestovnoj mreži. Na izvangradskim raskrižjima značajan udio u prometnom toku čine teška teretna vozila (tegljači s poluprikolicom i teretna vozila s prikolicom) te autobusi. Prethodna su istraživanja pokazala da je tegljač s poluprikolicom nepovoljniji od kamiona s prikolicom [17], a najveću površinu pri prolasku kroz zonu raskrižja prebriše petnaest metara dug troosovinski autobus [18]. Širina prebrisane površine ovisi o dimenzijama mjerodavnoga vozila (ukupnoj duljini i širini, duljini prednjeg i stražnjeg prepusta te međuosovinskim razmacima) (slika 3.).



Slika 3. Mjerodavna vozila – tegljač s poluprikolicom (lijevo), teretno vozilo s prikolicom (u sredini) [19], autobus (desno) [20]

Dimenzije mjerodavnoga vozila trebaju biti usklađene s važećim pravilnikom [21] i Direktivom EU komisije [22], gdje je propisano da sva vozila, kao i skupovi vozila moraju imati takve uređaje da pri vožnji u krugu, promjer vanjske opisane kružnice bude najviše 25,0 m, a promjer unutarnje kružnice najmanje 10,6 m. Mjerodavna su vozila za ispitivanje proвозnosti na trokrakim i četverokrakim raskrižjima definirana važećom hrvatskom normom [4] teretni automobil (duljine 9,0 m i širine 2,2 m) te teretni automobil s prikolicom (duljine 18,0 m i širine 2,5 m). Karakteristike tih vozila nisu usklađene s važećim pravilnikom [21] i Direktivom EU komisije [22], a ne odgovaraju ni današnjim potrebama tržišta.

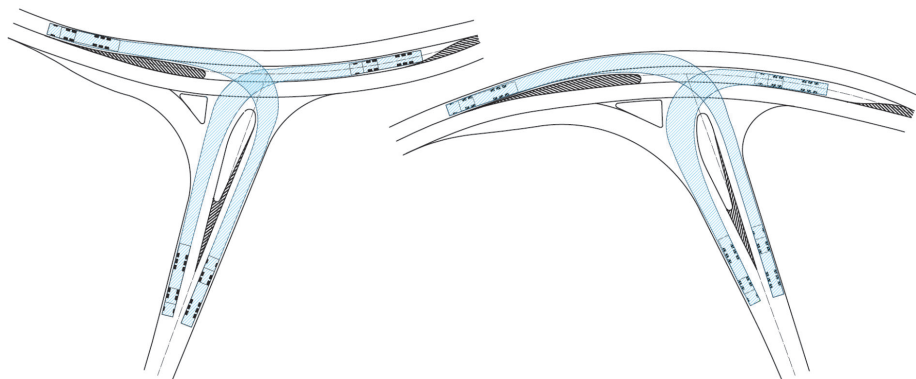
## 2.2 Ispitivanje proвозnosti

Ispitivanje probnim vožnjama konkretnih vozila na poligonu jedina je potpuno točna metoda za određivanje trajektorija kretanja. Međutim, takva su ispitivanja iznimno zahtjevna, jer iziskuju velika financijska sredstva i opsežne pripreme te se ne mogu primijeniti kao metoda određivanja trajektorija za veliki broj ispitivanja. Stoga se ispitivanje proвозnosti može izvršiti pomoću analitičkih i grafičkih metoda, fizičkih modela te računalnih programa.

Analitičke metode temelje se na matematičkim formulama kojima se za dani polumjer krivulje vođenja može odrediti maksimalno proširenje uz pretpostavku da su kotači vozila kruti. Proračun je maksimalnoga proširenja složen za skup vozila kao što je teretni automobil s prikolicom ili tegljač s poluprikolicom. Formule se ne mogu primjenjivati za slučaj vožnje unatrag. Prednost primjene fizičkih modela ogleda se u jednostavnom i brzom dobivanju rezultata, ali je izrada kvalitetnih modela i njihovo testiranje prema stvarnom ponašanju vozila dugotrajan proces i iziskuje znatna financijska sredstva. Grafičke metode temelje se na pretpostavci da je kretanje vozila u ravnini niz diferencijalnih pomaka dviju točaka, točke koja prati krivulju vođenja iz položaja "n" u položaj "n+1". Prednosti ovih metoda su: ne traže posebnu pripremu, vrlo su jednostavne, posebno ako se radi o pojedinačnom vozilu, te je moguće istraživati bilo koje oblike trajektorije kretanja svih tipova vozila proizvoljnih dimenzija.

Prethodno spomenute metode danas se sve rjeđe primjenjuju; proвозnost se ispituje uglavnom pomoću specijaliziranih računalnih programa (slika 4.). Osnovna je prednost računalnih simulacija kretanja vozila u tome što se na razmjerno jednostavan i brz način mogu definirati različiti tipovi vozila dimenzija po volji, zadavati različite linije vođenja i varirati skretni kutovi, a iscrtavanje trajektorija kretanja vozila brzo je i precizno. Provedena su istraživanja [12] pokazala visok stupanj pouzdanosti računalnih programa u odnosu na rezultate izmjerene na poligonu. Računalni programi za ispitivanje proвозnosti različitih proizvođača iscrtavaju približno jednake širine trajektorija kretanja (razlika je  $\pm 4,0$  cm) [23].





Slika 4. Računalno ispitivanje provoznosti

## 2.3 Provjera preglednosti

Kako bi se smanjila vjerojatnost nastanka prometnih nesreća, na svakom raskrižju mora biti osigurana dovoljna preglednost. Dovoljna duljina preglednosti vozaču vozila iz sporednoga smjera osigurava sigurno izvršenje prometnih radnji križanja (prolaz kroz čvorište) ili uplitanja (lijevo ili desno skretanje) kada za to postoje određeni uvjeti:

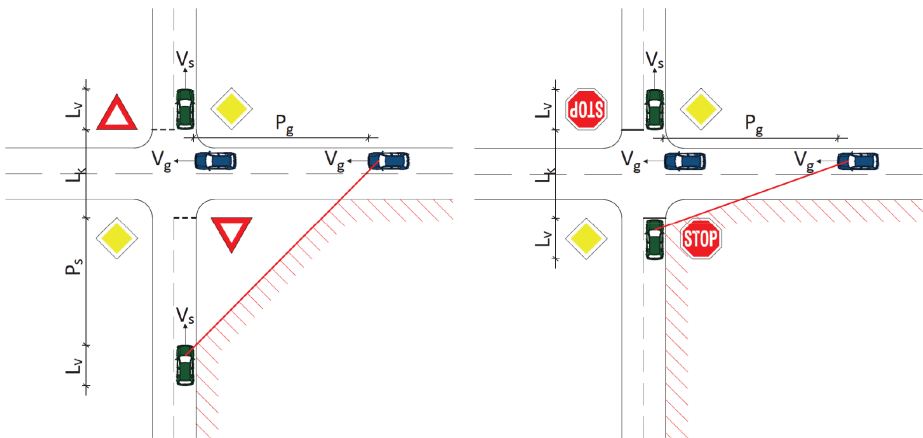
- “vremenska praznina”,
- poštivanje propisa (brzina),
- ispravna vozila,
- vidljivost.

Preglednost se provjerava konstrukcijom “polja preglednosti” unutar kojeg se ne smiju naći nikakve prepreke preglednosti (slika 5.) [4]. Pritom se razlikuju dva slučaja (slika 5.) [4]:

- vozilo koje nema prednost prelazi čvorište bez zadržavanja,
- vozilo koje nema prednost stoji (obvezno zaustavljanje je određeno postavljanjem prometnog znaka).

Veličina polja preglednosti ovisi o duljini promatranja iz vozila sa sporedne ceste (povezana je s vremenom reakcije vozača i putem kočenja), duljinom raskrižja te o potrebnoj duljini preglednosti na glavnoj cesti (povezana je s brzinom vozila). Prema hrvatskoj normi [4] polje preglednosti se crta samo za desnu stranu raskrižja.

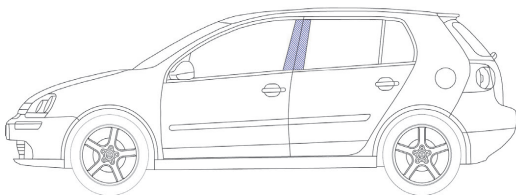
Radi ostvarenja dostatne preglednosti pri projektiranju raskrižja treba imati na umu sljedeće činjenice koje nisu spomenute u smjernicama [24, 25] ili normama [26]. Vozaču koji skreće ulijevo potrebno je više vremena da pogleda u oba smjera i ustanovi uvjete za sigurno izvršenje manevra nego vozaču koji skreće udesno i mora pogledati samo u jednom smjeru. Veća duljina preglednosti potrebna je kod višetračnih cesta u odnosu na dvotračne. Vozač mora vidjeti veći dio vozila koje se približava da bi mogao



$L_v$  – duljina vozila (m);  $L_k$  – duljina čvorišta u sporednom smjeru (m);  $P_s$  – duljina promatranja (zaustavni put) iz vozila sa sporedne ceste (m);  
 $P_g$  – duljina preglednosti na glavnoj cesti (m);  $V_g$  – brzina vozila na glavnoj cesti (m/s);  $V_s$  – brzina vozila na sporednoj cesti (m/s)

**Slika 5. Provjera preglednosti prema hrvatskim smjercima: vozilo koje nema prednost prelazi čvorište bez zadržavanja (lijevo), a vozilo koje nema prednost stoji (desno)**

procijeniti njegovu brzinu i udaljenost te na osnovi toga odabrati prikladan vremenski interval u glavnom toku potreban za izvršenje odgovarajućega manevra. Procjena trajanja vremenskih intervala između prolazaka vozila u prioritetnom toku postaje teža s povećanjem brzine. Starijim vozačima potreban je dulji interval za sigurno uključivanje. Općenito, stariji vozači zbog smanjenih fizičkih i percepcijskih sposobnosti predstavljaju potencijalnu opasnost za sebe i druge vozače [27–31]. Smanjenje kuta križanja cesta ispod 60° znatno povećava složenost manevra kretanja iz sporednoga smjera, prijedenu udaljenost i vrijeme potrebno za njegovo sigurno izvršenje. Vozačima vozila na cesti s prednošću prolaska treba određeno vrijeme (reakcije) kako bi zakočili ili izbjegli vozilo koje se uključuje u tok. To se vrijeme povećava s povećanjem gustoće priključaka na cestu [32].



**Slika 6. B-nosač krova i njegov utjecaj na vidno polje (Izvor: www.oeamtc.at)**

Kod raskrižja s kutovima presijecanja manjima od 70° i većim od 110° pri ispitivanju preglednosti treba uzeti u obzir konstrukcijske karakteristike kabine vozila. Provedena su istraživanja [31] pokazala da B – nosač krova vozila značajno otežava vidljivost vozaču

(slika 6.). Utjecaj je B – nosača izraženiji što je kut između sporedne i glavne ceste veći. Posljedica je navedenoga da vozač na sporednoj cesti ne može dobro procijeniti udaljenost vozila na glavnoj cesti.

Važeće smjernice [24, 25] i relevantne norme [26] ne uzimaju u obzir potrebne duljine preglednosti za manevre skretanja lijevo i desno sa sporedne na glavnu cestu. Kako su duljine preglednosti za manevre skretanja znatno veće od duljina preglednosti za prolazak raskrižjem, njihova primjena ne osigurava siguran tok prometa u zoni raskrižja, osobito za slučaj raskrižja bez obveznog zaustavljanja.

Osim prethodno opisane horizontalne preglednosti potrebno je provjeriti i vertikalnu preglednost. Za dobivanje realnih rješenja provjeru horizontalne i vertikalne preglednosti treba provoditi istovremeno. Danas se za to uobičajeno primjenjuju trodimenzionalni digitalni modeli raskrižja. Parametri za provjeru vertikalne preglednosti su visina oka vozača, visina prepreke te potrebna duljina preglednosti. Na raskrižjima u krivinama situacija se dodatno pogoršava zbog zakrivljenosti glavne ceste, pa treba istražiti utjecaj zakrivljenosti osi na duljine preglednosti.

### 3 Ciljevi istraživanja

Na temelju pregleda dosadašnjega stanja područja vezanog uz oblikovanje raskrižja u krivinama i uočenih nedostataka definirani su ciljevi planiranih istraživanja. Oni uključuju:

- detaljnu analizu utjecajnih parametara oblikovanja raskrižja u krivinama izvan naselja,
- definiranje mjerodavnih vozila za oblikovanje raskrižja u krivinama izvan naselja,
- definiranje minimalnoga horizontalnog polumjera osi nadređene ceste,
- definiranje graničnih kutova sjecišta osi privoza do kojih nije potrebna rekonstrukcija osi ovisno o uvjetima provoznosti mjerodavnog vozila, brzine prolaska vozila kroz raskrižje i preglednosti,
- definiranje graničnih uvjeta prostorne preglednosti,
- definiranje optimalnih elemenata oblikovanja,
- definiranje novoga pristupa projektiranju raskrižja u krivini koji će se zasnivati na oblikovanju elemenata na temelju geometrije kretanja vozila, a rezultat će optimalnim oblikovanjem raskrižja u pogledu zauzetosti okolnog prostora, provoznosti i preglednosti.

### 4 Zaključak

Odvijanje prometa na raskrižjima s gledišta sigurnosti bitno se razlikuje od odvijanja prometa na otvorenim potezima ceste. Zakrivljenost trase ceste na raskrižjima u krivinama dodatno utječe na sigurnost, posebice sa stajališta preglednosti. Zbog svega toga

oblikovanju raskrižja u krivinama treba pristupiti s posebnom pozornošću i dodatnim znanjem. Dodatni problem predstavljaju i važeće smjernice i norme za oblikovanje raskrižja koje uglavnom daju općenite preporuke i upute za oblikovanje raskrižja u pravcu, te ih nije moguće u potpunosti primijeniti na raskrižjima u krivinama.

Trajektorije kretanja mjerodavnih vozila treba upotrijebiti kao osnovu za optimalno oblikovanje raskrižja, a ne samo za provjeru provoznosti. Karakteristike odabranih mjerodavnih vozila treba uskladiti s karakteristikama vozila koja su najzastupljenija u prometnom toku. Razvojem specijaliziranih računalnih programa omogućeno je brzo i precizno simuliranje kretanja vozila. Zahvaljujući tome postavljeni su temelji za promjenu dosadašnjeg i izradu novoga pristupa oblikovanju. Novim pristupom bi se na početnoj shemi raskrižja najprije definirale trajektorije mjerodavnoga vozila za sve smjerove kretanja, a zatim bi se, uzimajući u obzir zaštitne širine, odredio položaj i dimenzije svakog pojedinog elemenata raskrižja. Na taj način bi se izbjegao veći broj iteracija, osobito kod složenijih raskrižja kao što su ona u krivinama.

Osiguranje dovoljne duljine preglednosti preduvjet je za sigurno odvijanje prometa u zoni raskrižja. Pri oblikovanju raskrižja treba uvažiti sve činjenice koje utječu na duljinu preglednosti (stariji vozači, konstrukcija vozila, kutovi križanja osi i polumjer krivine). Zbog toga treba detaljnije istražiti utjecaj zakrivljenosti i veličine polumjera krivine na provoznost mjerodavnog vozila i duljine preglednosti.

## Literatura

- [1] Ye, X., Pendyala, M.R., Washington, P.S., Konduri, K., Oh, J.: A Simultaneous Equations Model of Crash Frequency by Collision Type for Rural Intersections, *Safety Science*, 47 (2009) 3, pp. 443-452.
- [2] Abdel-Aty, M., Haleem K.: Analyzing Angle Crashes at Unsignalized Intersections Using Machine Learning Techniques, *Accident Analysis and Prevention*, 43 (2011) 1, pp. 461-470.
- [3] Wang, Y. G., Bai, H., Xiang, W.: Traffic Safety Performance Assessment and Multivariate Treatments for Intersection Locations, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 6 (2011) 1, pp. 30-38.
- [4] Hrvatska norma HRN U.C4.050, Projektiranje i građenje cesta, površinski čvorovi, tehnički uvjeti, 1990.
- [5] Richtlinien für die Anlage von Landstraßen Ausgabe 2012. Der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV). Bonn, 16.5.2013.
- [6] Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Schweizer Norm (SN 640262), Zürich, 1999.
- [7] Plangleiche Knoten – Kreuzungen, T - Kreuzungen, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), (RVS 03.05.12), Wien, 2007.

- [8] A Policy on Geometric Design of Highways and Streets 2011. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [9] Bilten o sigurnosti cestovnog prometa 2015., Ministarstvo unutarnjih poslova Republike Hrvatske, Zagreb, 2016.
- [10] Montella, A., Aria, M., D'Ambrosio, A., Perneti, M.: Simulator evaluation of drivers' speed, deceleration and lateral position at rural intersections in relation to different perceptual cues, *Accident Analysis and Prevention*, 43 (2011) 3, pp. 2072-2084.
- [11] Galante, F., Mauriello, F., Montella, A., Perneti, M., Aria, M., D'Ambrosio, A.: Traffic calming along rural highways crossing small urban communities: Driving simulator experiment, *Accident Analysis and Prevention*, 42 (2010) 6, pp. 1585-1594.
- [12] Korlaet, Ž., Dragčević, V., Stančerić, I.: Designing Criteria of Acute Angle Four-Leg Intersection At-Grade, *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design*, Valencia, 2010.
- [13] Stančerić, I.: Teorijske postavke oblikovanja četverokrakih čvorišta u razini na načelima geometrije kretanja vozila, *Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu*, 2011.
- [14] Autey, J., Sayed, T., Zaki, M. H.: Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic conflict analysis, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 45, (2012), pp. 120-130.
- [15] Persaud, B., Lyon, C., Gross, F., Eccles, K.: Safety Evaluation of Offset Improvements for Left-Turn Lanes, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Highway Geometric Design*, Valencia, 2010.
- [16] Al-Kaisy, A., Roefaro, S.: Channelized Right-Turn Lanes at Signalized Intersections: A Review of Practice, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Highway Geometric Design*, Valencia, 2010.
- [17] Ahac, S.: Oblikovanje izvangradskih kružnih raskrižja na načelima geometrije kretanja vozila, *Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu*, 2014.
- [18] Bezina, Š., Stančerić, I., Ahac, S.: Swept path analysis on roundabouts for three-axle buses - review of the Croatian design guidelines, *4<sup>th</sup> International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2016*, 23-25 May 2016, Šibenik, Croatia, pp. 901-908.
- [19] Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama, *Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci*, 2014.
- [20] *Bemessungsfahrzeuge und Schleppkurven zur Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen*, Forschungsgesellschaft für Strassen&#8208; und Verkehrswesen, FGSV, Köln, 2001.
- [21] *Pravilnik o tehničkim uvjetima vozila u prometu na cestama ("Narodne novine"*, broj 51/10, 84/10, 145/11, 140/13, 85/14 i 83/15).

- [22] Direktiva 2002/7/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 18. veljače 2002. o izmjeni Direktive Vijeća 96/53/EZ o utvrđivanju najvećih dopuštenih dimenzija u unutarnjem i međunarodnom prometu te najveće dopuštene mase u međunarodnom prometu za određena cestovna vozila koja prometuju unutar Zajednice.
- [23] Cestar, I.: Provoznost cestovnih raskrižja, Diplomski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [24] Smjernice za projektiranje raskrižja u naseljima sa stajališta sigurnosti prometa FPZ i PGZ/HC, 2004.
- [25] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Richtlinien für die Anlage von Landstraßen RAL, Köln, 2012.
- [26] Knoten in einer Ebene (ohne Kreisverkehr) SN 640 262, FSS, Zürich, 1999.
- [27] Tollazzi, T., Renčelj, M., Rodošek, V., Zalar, B.: Traffic safety of older drivers in various types of road intersections, *Promet - Traffic&Transportation*, 22 (2010) 3, pp. 193-201.
- [28] Dukic, T., Broberg, T.: Older drivers' visual search behaviour at intersections, *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 15 (2012) 4, pp. 462-470.
- [29] Keskinen, E.: Education for older drivers in the future, *IATSS Research- Designing Mobility for the Coming Age*, 38 (2014) 1, pp. 14-21.
- [30] Smiley, A.: *Human Factors in Traffic Safety*, 3<sup>rd</sup> edition, Arizona: Lawyers & Judges Publishing Company, 2015.
- [31] Krauss, D.: *Forensic Aspects of Driver Perception and Response*, 4<sup>th</sup> edition, Lawyers & Judges Publishing Company, 2015.
- [32] Cvitančić, D., Vujasinović, A., Stazić, T.: Preglednost cestovnih raskrižja u razini, *Građevinar*, 63 (2011) 10, pp. 859-868.



# Analiza skupljanja samozbijajućega betona eksperimentalnim i analitičkim metodama

Mr.sc. Donka Würth<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Ivana Banjad Pečur<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, [dwurth2@tvz.hr](mailto:dwurth2@tvz.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, [banjadi@grad.hr](mailto:banjadi@grad.hr)

## Sažetak

Skupljanje samozbijajućega betona je volumna promjena koja se javlja u svakom betonu, pa tako i u samozbijajućem. Pojava pukotina u betonu zbog skupljanja betona česta je pojava u praksi, te je zbog agresivnoga djelovanja okoliša (voda, prisutnost klorida, CO<sub>2</sub>) otvoren put za razvijanje procesa korozije armature, a time i degradacije ab elementa. Samozbijajući beton ima veće predispozicije za pojavu skupljanja nego obični beton, jer u svojem sastavu ima veću količinu praškastih materijala, te manje maksimalno zrno agregata (16 mm). U radu su prikazani dosadašnji rezultati i zaključci o pojavi skupljanja samozbijajućega betona i dani su novi modeli predviđanja njegova skupljanja. Teorijskom analizom i eksperimentalnim ispitivanjima dala bi se povezanost, predvidivost skupljanja samozbijajućeg betona.

*Ključne riječi: samozbijajući beton, skupljanje, sastavni materijali, sastav betona, njegovanje*

## Shrinkage of self-compacting concrete – experimental and analytical analysis

### Abstract

Shrinkage deformation of self-compacting concrete is the volume change that occurs in any concrete, including the self-compacting concrete. Drying shrinkage is a common cause of cracking in concrete and aggressive environmental actions (water, presence of chloride, CO<sub>2</sub>) open the way to development of the reinforcement corrosion process and, over time, to the degradation of RC elements. The self compacting concrete is more prone to shrinkage compared to regular concrete, because concrete contains a greater amount of powdered materials, and the maximum grain size is lower (16 mm). In order to reduce shrinkage of self-compacting concrete, it is necessary to analyze concrete constituents, concrete mix design, and the curing time of concrete. The paper presents the results and conclusions about shrinkage of self-compacting concrete, and proposes new models for predicting shrinkage of self-compacting concrete.

*Key words: self-compacting concrete, shrinkage, constituents, concrete composition, curing*



## 1 Uvod

Samozbijajući beton je beton superiorne sposobnosti tečenja koji uz pomoć vlastite težine teče, zaobilazi prepreke armature i puni oplatu bez dodatnog vibriranja. Zbog svoje velike fluidnosti i obradljivosti jako je kompaktan, te nema pojave segregacije niti izdvajanja vode. Ovom vrstom betona ostvaruje se niz prednosti:

- olakšana je ugradnja betona u konstrukciju,
- dodatno je ubrzana gradnja,
- potreban je manji broj radnika,
- manja je buka i potreba za energijom (nema potrebe za vibriranjem),
- jeftinija gradnja.

Proizvodnja samozbijajućega betona početno je nešto skuplja nego tradicionalni beton, međutim ušteda prilikom ugradnje i tijekom vremena gradnje ipak je rezultirala kumulativno znatno jeftinijom gradnjom nego s običnim betonom.

Dobar samozbijajući beton mora biti tekuć, ali i dovoljno viskozozan, kako bi se ugradio sam, bez zahtjeva za vibriranjem. Nakon skidanja oplata površina ostaje glatka, bez šupljina i zadovoljava estetske kriterije za vidljive betone, a očvrslu beton ima svojstva običnog betona. Samozbijajući beton sastoji se od istih sastavnih materijala kao i obični beton (agregat, cement, voda, superplastifikator), a jedina je razlika što se u sastavu samozbijajućeg betona rabi veći sadržaj sitnih čestica (> 500 µm), uz ograničenje da je maksimalno zrno agregata 16 (20) mm te je obavezna primjena dodataka superplastifikatora.

Zbog povećane količine sitnih čestica samozbijajući je beton osjetljiviji na povećano skupljanje, a time i na pojavu pukotina. Osim sastavnih sastojaka betona, na skupljanje samozbijajućeg betona utječu sastav betona te njega betona nakon ugradnje (temperatura, relativna vlaga zraka), a isto tako značajan utjecaj ima duljina vremena njegovanja betona.

Proizvodnja samozbijajućega betona ponajprije se klasificira prema razredima konzistencije i tlačnoj čvrstoći, te ako je potrebno projektant može zahtijevati još dodatna svojstva trajnosti očvrstlog betona, kao što su otpornost na smrzavanje i odmrzavanje bez soli i s njom, habanje, zahtjevi za propusnost betona. Zahtjev za minimalnim skupljanjem ne postavlja se kao dodatni zahtjev (ako za to ne postoji dobar razlog), međutim, ako je ab konstrukcija u kontaktu s vodom, pukotine su često velika opasnost za trajnost konstrukcije.

Optimalan omjer i kombinacija sastavnih materijala betona morali bi dati beton koji zadovoljava zahtjeve svježeg i očvrstlog samozbijajućeg betona.

Prilikom projektiranja samozbijajućega betona postoji nekoliko smjernica koje će osigurati njegova dobra svojstva. Smjernice za projektiranje samozbijajućeg betona postavili su japanski stručnjaci Okamura i Ozawa [1], dok u Europi postoje druge metode projektiranja sastava samozbijajućih betona (UCL, LCPC, metoda ekvivalentnog morta), od kojih se najčešće primjenjuje CBI metoda razvijena u Švedskoj pod nadzorom Billberga

[2]. Najvažnija potvrda dobrog projektiranja sastava betona bit će rezultati ispitivanja svježeg i očvrsllog samozbijajućeg betona.

U novim propisima i u novoj normi HRN EN 206:2013, *Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost*, samozbijajući je beton uključen u proces certificirane proizvodnje, tako da će na hrvatskom tržištu ova vrsta betona imati svoje mjesto.

## 2 Skupljanje samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton, kao i svaki drugi beton, ima volumne deformacije koje se javljaju u ranoj fazi hidratacije i kasnije u fazi očvršćavanja, a mogu uzrokovati pukotine u betonu (slika 1.). Zbog promjene vlažnosti u betonu i fizičko–kemijskih promjena u betonu dolazi do pojave skupljanja. Skupljanje se izražava kao bezdimenzionalna deformacija u mm/m ( $10^{-3}$ ) ili m/m ( $10^{-6}$ ) u uvjetima stalne i određene relativne vlažnosti i temperature. Skupljanje je deformacija betona tijekom vremena i to na neopterećenom uzorku.



Slika 1. Mjerenje pukotina u armiranobetonskom zidu

Ukupno skupljanje betona može se prikazati kroz nekoliko faza pojave skupljanja, a to su prema [3]: **plastično skupljanje**, koje nastaje evaporacijom vode zbog početka hidratacije, **autogeno skupljanje** nastaje nakon jednog dana (promjena vlažnosti u očvrslom betonu), zbog hidratacije cementa povećava se temperatura betona, te na kraju nastaje skupljanje betona **zbog sušenja** (nakon završetka hidratacije) koje je manje, ali može trajati godinama [4]. Izraz koji opisuje pojavu skupljanja betona (CEB-FIB, EC2), dana u izrazu (1), vrijedi i za samozbijajuće betone:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t, t_c) + \varepsilon_{ods}(t, t_c) \quad (1)$$

gdje su:

- $\epsilon_{sh}$  - ukupna deformacija skupljanja,
- $\epsilon_{cas}$  - autogeno skupljanje,
- $\epsilon_{c ds}$  - skupljanje uslijed sušenja,
- $t$  - starost betona u danima,
- $t_c$  - starost betona u danima na početku skupljanja,
- $t-t_c$  - trajanje sušenja u danima.

Na skupljanje prije svega utječu sastavni materijali betona [5], vrsta cementa, količina mineralnih dodataka [6], vrsta i količina filera [7], vrsta i udio agregata te v/c faktor. Dosadašnja ispitivanja pokazala su da dimenzije elementa koji se betonira, uvjeti okoline, vrijeme i način njegovanja utječu na rezultate skupljanja betona, a uz pravilno njegovanje skupljanje se može smanjiti [8]. Beton koji je njegovan u vodi pokazuje veće čvrstoće. Pojava pukotina zbog skupljanja u samozbijajućem betonu je učestala, s obzirom na veliki udio sitnih čestica i veću količinu cementa [9].

Kod običnog betona često je razlog skupljanja gubitak vlage iz betona zbog sušenja, pri čemu će beton s visokim v/c omjerom ( $> 0,4$ ) imati relativno malo autogeno skupljanje [10]. Nasuprot tome, samozbijajući beton koji ima niski v/c omjer ( $0,3 - 0,4$ ), u kombinaciji s visokim sadržajem veziva dovest će do većeg autogenog skupljanja, zbog uporabe veće količine praškastih komponenti cementna i punila. Stoga se kod samozbijajućega betona mora uzeti u obzir skupljanje zbog sušenja i autogeno skupljanje [11].

### 3 Teorijsko predviđanje skupljanja samozbijajućega betona

Modeli koji pokazuju skupljanje običnoga betona poznati su i uglavnom normirani. Kod samozbijajućega betona, koji je različit u sastavu od običnog betona, model predviđanja skupljanja temelji se na prikupljenim podacima. U svijetu ima dosta podataka o skupljanju samozbijajućeg betona i mnogo provedenih ispitivanja [12]. U prvotnim razmatranjima cilj je bio napraviti bazu podataka o prikupljenim podacima ispitivanja samozbijajućeg betona. Ponekad rezultati, koji su dobiveni eksperimentalno i objavljeni su, nemaju sve potrebne podatke o sastavnim materijalima, rezultati su nepotpuni ili su objavljeni grafički, tako da nastaju problemi oko baze podataka. Nekoliko autora Abdalhmid J. [13], Aslani F. i Nejadi S. [14] napravilo je usporedbu poznatih metoda predviđanja skupljanja za obične betona CEB-FIB, ACI, EUROCODE 2, JSCE, AASHTO te usporedilo s rezultatima skupljanja dobivene eksperimentalnim metodama samozbijajućeg betona i to autora Poppe i De Schutter, Larson, Cordoba, Khayat i Long. Do novih modificiranih metoda predviđanja skupljanja samozbijajućega betona došlo se usporedbom običnog betona i samozbijajućeg betona [14]:

- uspostava baze eksperimentalnih podataka o skupljanju i puzanju betona,
- uspostava baze modela predviđanja o skupljanju i puzanju betona,

- usporedba baze modela predviđanja i eksperimentalnog ispitivanja,
- modeli samozbijajućeg betona utemeljeni na prethodnim usporedbama,
- potvrda predloženih modela ispitivanjima samozbijajućeg betona.

Ukupno skupljanje samozbijajućega betona razdijeljeno je na autogeno skupljanje i skupljanje zbog sušenja. Vidljive su velike razlike u predviđanju skupljanja samozbijajućih običnih betona i betona visokih čvrstoća, te su autori Aslani i Maia [14] dali nove modele predviđanja skupljanja za obične samozbijajuće betone (< 55 MPa) i samozbijajuće betone visokih čvrstoća (> 55 MPa), prema izrazima (2) i (3):

### Autogeno skupljanje

$$\varepsilon_{as}(t, t_0) = \varepsilon'_{as}(t) - \varepsilon'_{as}(t_0) \quad (2)$$

gdje su:

$\varepsilon_{as}$  - autogeno skupljanje,

$t$  - starost betona u danima,

$t_0$  - starost betona u danima – početak skupljanja.

Kod autogenog skupljanja koeficijenti koji se nalaze u formuli vezani su na v/c omjer i vrste cimente.

### Skupljanje zbog sušenja

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty}(t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (3)$$

gdje su:

$\varepsilon'_{ds}$  - skupljanje zbog sušenja,

$\varepsilon'_{ds\infty}$  - konačna vrijednost skupljanje zbog sušenja, ovisi o omjeru ci praškastih komponenti,

$\beta$  - koeficijent koji ovisi o odnosu volumena i površine.

Kod skupljanja zbog sušenja koeficijenti u jednadžbi ovisni su o dimenzijama elementa, omjeru cementa i praškastih komponenata te o toplini hidratacije cementa. Autori prilikom izvođenja modela za predviđanje skupljanja samozbijajućeg betona, osim što su betone podijelili u grupe (obične i betone visokih čvrstoća), kod betona visokih čvrstoća dali su naglasak na c/p omjer (cementno/praškast omjer), pri čemu su dokazali da veliki utjecaj na skupljanje ima ukupna količina praškastih komponenti.

U Hrvatskoj je dr. sc. Elica Marušić promatrala skupljanje betona visoke čvrstoće te odredila model predviđanja skupljanja za tu vrstu betona [15], što će biti osnova za

daljnja promatranja kod samozbijajućega betona. Njezina istraživanja betona s većim udjelom cementa djelomično se mogu uklopiti u sastave samozbijajućeg betona koji imaju povećanu količinu cementa.

#### **4 Način i vrijeme njegovanja samozbijajućega betona**

Kada govorimo o fazi skupljanja betona zbog sušenja, moramo naglasiti da u toj fazi vrlo veliki utjecaj na brzinu sušenja kod tanjih elemenata ima okolina, dakle otvorena površina ab elementa. Često se u praksi najmanje pozornosti posvećuje njegovanju betona, jer se ne može angažirati čovjek koji će paziti na njegovanje ili su elementi već izloženi daljnjoj eksploataciji ili su nedostupni za daljnje njegovanje. Element koji se nalazi u oplati već je dijelom zaštićen od evaporacije vlage iz betona, međutim oplata se skida nakon 24 sata i elementi ostaju prepušteni djelovanju okoliša. Ako klimatski uvjeti nisu ekstremni, tada će vrijeme manje utjecati na sušenje ab elementa. Kod izrade ovog rada, na kraju eksperimentalnih mjerenja promatrat će se ponašanje promjene skupljanja u slučaju nenjegovanog i njegovanog uzorka. Također će se usporediti dvije mogućnosti njegovanja: klasično vodom i moderna metoda njegovanja kemijskim sredstvima za sprečavanje evaporacije vode iz betona.

#### **5 Ispitivanje skupljanja samozbijajućega betona**

Kod eksperimentalnih, laboratorijskih ispitivanja skupljanja betona, postavlja se pitanje koja je metoda mjerodavna za ispitivanje skupljanja: jednodimenzionalno (mjerenjem svježeg betona s LVDT-om), ultrazvučno (volumnim mjerenjem) ili mjerenjem poroznosti s MIP (Mercury intrusion porosimetry) [4]. U Hrvatskoj razlikujemo dvije metode mjerenja skupljanja: HRN U.M1.025, kada je beton star 3 dana (ne vidi se skupljanje u fazi hidratacije betona, skupljanja zbog kemijskih reakcija i oslobađanja topline hidratacije), a druga je metoda mjerenje skupljanja betona u svježem stanju za koju ne postoji normirana metoda već se u nekim laboratorijima ispitivalo prema vlastitim spoznajama [15].

#### **6 Zaključak**

Skupljanje betona je volumna deformacija koja se javlja u samozbijajućem betonu, a posljedica je pojava pukotina. Učestala pojava pukotina na ab elementima veliki je nedostatak i otvoreni put za agresivni medij koji prodire u konstrukciju i smanjuje trajnost građevine. Pojava skupljanja samozbijajućega betona ovisi o sastavu betona, načinu i vremenu njegovanja ugrađenog betona. Na temelju proučene literature istraživanja u svijetu o skupljanju samozbijajućeg betona, te ponuđenih novih modificiranih modela predviđanja skupljanja može se pretpostaviti skupljanje samozbijajućega betona.

Uz eksperimentalna ispitivanja u laboratoriju može se potvrditi predviđeno skupljanje samozbijajućeg betona. U doktorskoj disertaciji analizirat će se modeli predviđanja skupljanja i usporediti s eksperimentalnim rezultatima. Kod samih mjerenja obratit će se pozornost na nenjegovane i njegovane uzorke na dva načina: vodom i kemijskim sredstvima. Krajnji cilj ove doktorske disertacije bit će smjernice za projektiranje samozbijajućeg betona radi smanjenja skupljanja, te smjernice za njegovanje ugrađenog samozbijajućeg betona radi smanjenja pojava pukotina.

## Literatura

- [1] Okamura, H., Ozawa, K.: Mix-design for self -compacting concrete, Concrete Library of JSCE, No.25, June 1995., pp.1 07-120.
- [2] Billberg, P.: Mix design model for self-compacting concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute Mehta, P.: Concrete in the marine environment. Essex IG11 8JU, England: Elsevier Science Publishers Ltd., 1991.
- [3] Šahinagić-Isović, M., Markovski, G., Čećez, M.: Deformacije skupljanja betona - uzroci i vrste, Građevinar, 64 (2012) 9, pp. 727-734.
- [4] EL-Khoury, R.D.: Creep and Shrinkage behavior of SCC, Dissertation Rutgers, The State University of New Jersey, New Brunswick, New Jersey, October, 2010.
- [5] Hammer, T.A.: The Influence of some mix design parameters on drying shrinkage of SCC, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 559 - 564, 2007.
- [6] Barluenga, G., Puentes, J., Palomar, I., Rio, O.: Early Age Drying Shrinkage Evaluation of Self-Compacting Concretes and Pastes with Mineral Additions, CONCREEP 10: pp. 1514-1523, 2015.
- [7] Craeyea, B., De Schuttera, G., Desmetb, B., Vantommeb, J., Heirmanc, G., Vandewallec, L., Cizerc, Ö., Aggound, S., Kadrid, E.H: Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, 40 (2010) 6, pp. 908-9013.
- [8] Loser, R., Leemann, A.: Effects of curing time and drying behaviour of SCC in case of restrained shrinkage deformations 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 539 - 544, 2007.
- [9] Schutter, G., Bartos, P.J.M., Domone, P., Gibbs, J.: Self-compacting concrete, Scotland UK, pp. 115-121, 2008.
- [10] Aslani, F., Nejadi, S.: Creep and Shrinkage Self-Compacting Concrete (SCC) Analytical Models, Jurnal of Civil Engineering and Architecture, USA, 6 (2012) 1, pp. 93-100.
- [11] Long, W.J., Khayat, K.H., Xing, F.: Prediction on Autogenous Shrinkage of Self-Consolidating Concrete, Advanced Materials Research, Vols. 150-151, pp. 288-292, 2011.

- [12] Aslani, F., Nejadi, S.: Shrinkage behavior of self-compacting concrete, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 13 (2012) 6, pp. 407-419.
- [13] Abdalhmud, J., Mahgub, M., Ashour, A.F., Lam, D., Sheehan, T.: Prediction of drying shrinkage and compressive strength of self-compacting concrete using artificial neural networks, *34<sup>th</sup> Cement and Concrete Science Conference*, 14-17 September 2014, University of Sheffield, pp. 188-193.
- [14] Aslani, F., Maia, L.: Creep and shrinkage of high-strength self-compacting concrete: Experimental and analytical analysis, *Magazine of Concrete Research*, 65 (2013) 17, pp. 1044 - 1058.
- [15] Marušić, E.: Predviđanje deformacija skupljanja betona visoke čvrstoće, *Doktorska disertacija*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.

# Upotreba recikliranoga betona kao agregata u spravljanju samozbijajućeg betona

Hamdo Mešić<sup>1</sup>, izv.prof.dr.sc. Marijan Skazlić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GP-PLAN d.o.o., Bihać, [hamdo.mesic@hotmail.com](mailto:hamdo.mesic@hotmail.com)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, [skazle@grad.hr](mailto:skazle@grad.hr)

## Sažetak

Samozbijajući beton se u osnovi temelji na modifikaciji klasičnoga betona dodacima koji smanjuju potrebnu količinu vode, a povećavaju pokretljivost svježeg betonske mješavine. U svježem stanju ovaj je beton tekuće konzistencije, pri čemu ne smije doći do segregacije niti izdvajanja vode, što se osigurava upotrebom superplastifikatora i mineralnih dodataka. Pravilnim odnosom sitnoga i krupnog agregata povećava se gustoća pakiranja čvrstih čestica, te se smanjuje potreba za vodom. Beton je danas građevinski materijal koji se najviše primjenjuje kod izgradnje građevinskih objekata. Recikliranjem već upotrijebljenoga betona dobiva se novi proizvod (agregat). U radu se analizira upotreba recikliranog betona kao agregata kod spravljanja samozbijajućeg betona.

*Ključne riječi: samozbijajući beton, građevinski otpad, reciklirani agregat*

## Use of recycled concrete as aggregate for self-compacting concrete (SSC)

### Abstract

The self-compacting concrete (SSC) is substantially based on modification of traditional concrete with additives that reduce the necessary amount of water and increase mobility of fresh concrete mixture. In fresh state, this concrete is of liquid consistency, and should not allow segregation or separation of water, which is ensured by the use of modern plasticizers and mineral cement additives. Proper ratio of fine to coarse aggregate increases the packing density of solid particles and reduces the need for adding significant amounts of water. As a construction material, concrete is nowadays most commonly used in the construction of most man-made structures. Recycling of used concrete results in generation of a new product (aggregate). The use of recycled concrete as aggregate in the preparation of self-compacting concrete is analysed in the paper.

*Key words: self-compacting concrete, construction waste, recycled aggregate*



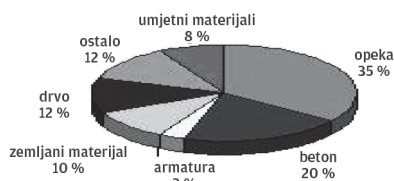
## 1 Uvod

Samozbijajući beton (u nastavku: SCC) u osnovi se temelji na modifikaciji običnoga betona dodacima koji smanjuju potrebnu količinu vode, a povećavaju pokretljivost svježeg betonske mješavine. Samozbijajući beton je beton koji ima dobra mehanička i trajnosna svojstva. Principe dobivanja samozbijajućeg betona objasnio je Okamura [1]. Prema Okamuri, samozbijajući se beton može dobiti na sljedeći način:

- I – ograničenjem količine krupnoga agregata i veličine maksimalnog zrna agregata,
- II – malim vodocementnim omjerom,
- III – uporabom superplastifikatora.

Samozbijajući beton vlastitom težinom ispunjava oplatu čak i ako se u oplati nalazi velika količina armature, tako da ni ručno ni mehaničko vibriranje nije potrebno. U svježem je stanju ovaj beton tekuće konzistencije, pri čemu ne smije doći do segregacije niti odvajanja vode. Uporabom modernih dodataka za beton, kao što su superplastifikator i mineralni dodaci betonu (leteći pepeo, silicijska prašina), te pravilnim odnosom sitnoga i krupnog agregata omogućuje se postizanje ovakvih svojstava. Pažljivim odabirom sitnoga agregata i punila povećava se gustoća pakiranja čvrstih čestica, te se omogućava smanjenje potrebne količine vode.

Beton, kao građevinski materijal, jako je važan kod izgradnje građevinskih objekata. Nakon što prođe vijek trajanja građevine, ona se ruši. Materijal koji se dobiva rušenjem starih zgrada može se reciklirati te upotrijebiti kao novi agregat za proizvodnju betona. Sastav građevinskog otpada koji se dobiva rušenjem starih objekata prikazan je na slici 1. Na slici 2. prikazan je udio pojedinih vrsta građevinskog otpada. Recikliranjem građevinskog otpada koji sadrži beton, opeku i cementni mort kao glavne komponente dobivamo reciklirani agregat. Za proizvodnju i korištenje visoko kvalitetnih recikliranih agregata rabi se cementni beton.



Slika 1. Sastav građevinskog otpada kod razgradnje stambenih objekata [3]



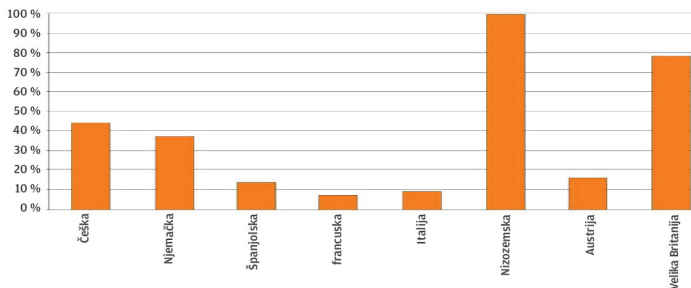
Slika 2. Udio pojedinih vrsta građevinskog otpada [3]

## 2 Potreba za recikliranjem građevinskog otpada

Nakon održavanja simpozija u Rio de Janeiru 1992. godine održivi razvoj i očuvanje čovjekove okoline postali su ključni faktori modernog društva [2]. Jedan od osnovnih problema događa se kada dotrajale građevinske objekte treba srušiti te ih zamijeniti novim objektima. Osnovni je razlog rušenja starih objekata njihova dotrajalost. Rušenjem starih i dotrajalih objekata stvara se građevinski otpad koji treba negdje odložiti. Građevinski otpad predstavlja jedan od najvećih ekoloških problema u zemljama Europske unije kao i u mnogim drugim razvijenim zemljama svijeta. Reciklažom građevinskoga otpada štede se neobnovljivi prirodni resursi te se smanjuje potreba za njihovim korištenjem. Recikliranje i očuvanje prirodnih resursa kao dugoročne ciljeve građevinska je industrija bezrezervno prihvatila, ali pozitivni su učinci takvoga pristupa još uvijek donekle ograničeni zato što nisu osigurani svi uvjeti za veću primjenu recikliranih materijala [3]. Ovi uvjeti obuhvaćaju nedostatak:

- prostora i opreme za sortiranje građevinskog otpada,
- iskustva u postupcima recikliranja otpadnih materijala,
- obučeni radnika i kontrolora,
- znanja o tržištu sekundarnih materijala,
- zakonske regulative u području zaštite okoliša itd.

Bez obzira na navedene nedostatke, pojedine su države uspjele dostići visoku razinu primjene recikliranog građevinskog otpada (Danska 80 %, Nizozemska 7 %, Japan 65 %) [4]. Na slici 3. prikazana je razina dostignuća primjene recikliranog agregata u pojedinim državama.



Slika 3. Reciklirani otpad u 2008. godini (UEPG, 2009-2010 i Eurostat, 2008 - elaborirao ANPAR)

Građevinski otpad koji se javlja nakon rušenja građevinskih objekata treba negdje zbrinuti kako ne bi postao ekološki problem, s čim se suočavaju mnoge europske zemlje. Ukupan otpad koji se napravi u EU iznosi oko 180 milijuna tona godišnje ili 480 kg po stanovniku [5]. Krajem 20. i početkom 21. stoljeća došlo je do velikog razvoja građevinarstva. Prema nekim analizama, eksploatacija pijeska dovela je do erozije plaža u

svijetu i to gotovo 40 m u periodu od 1968. do 2008. godine. S druge strane, moderna tehnologija betona treba biti ekološki održiva kako bi se smanjila proizvodnja cementa, reducirala emisija CO<sub>2</sub>, i potrošnja energije te omogućilo korištenje recikliranog materijala. Recikliranjem betona iz konstrukcije dobiva se novi građevinski proizvod, te se smanjuje potreba za korištenjem prirodnih resursa. Na slikama 4. i 5. prikazan je stari beton prije reciklaže i stari beton nakon prerade u potrebne frakcije.



Slika 4. Stari beton prije reciklaže [4]



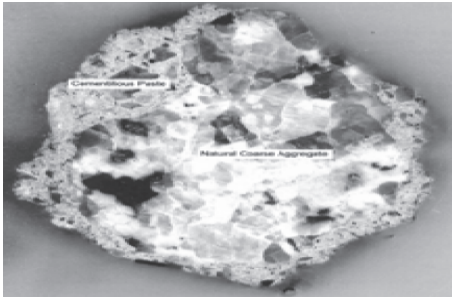
Slika 5. Stari beton nakon prerade (frakcije recikliranog agregata) [4]

Svjedoci smo da je sve više deponija koje degradiraju tlo, smanjuju površinu obradivog zemljišta te postaju potencijalni izvor zaraze stanovništva. Broj stanovnika na našem planetu premašio je brojku od 7 milijardi. Povećanjem stanovništva povećava se i otpad koji se mora negdje zbrinuti. Budući da se pojavljuje značajan pad opskrbe prirodnim agregatom u blizini gradilišta te da su dostupne jednostavne tehnologije za recikliranje, došlo je do toga da ljudi sve više recikliraju građevinski otpad.

Na slici 6. prikazano je reciklažno pokretno postrojenje koje je postavljeno neposredno na mjesto rušenja starog objekta, te mjesto izgradnje novoga objekta. Može se zaključiti da je takav oblik recikliranja višestruko koristan. Na slici 7. prikazano je zrno recikliranoga agregata. Ono se sastoji od prirodnoga agregata koji je oblijepljen slojem cementnog morta.



Slika 6. Reciklažno pokretno postrojenje [5]



Slika 7. Izgled zrna recikliranog agregata [5]

Oblijepljeni dio oko zrna agregata porozan je, a njegova poroznost ovisi o vodocementnom omjeru betona koji je recikliran [14]. Fizička i mehanička svojstva recikliranoga agregata ovise kako o svojstvima tako i o količini preostalog cementnog morta na agregatu. Na količinu cementnoga morta utječe tehnologija proizvodnje i drobljenja starog betona te dimenzije recikliranog agregata [15]. Što je veći udio sitnije frakcije agregata, veća je količina cementnoga morta [16]. Upijanje vode kod krupnoga agregata kreće se od 3,5 % do 10 % [17], a kod sitnog agregata od 5,5 % do 13 % [9].

Poredbe radi, prirodni riječni i drobljeni agregat imaju oko 1 % upijanja vode, pa se zbog toga smatra da je najveća razlika između prirodnoga i recikliranog agregata upijanje vode pri spravljanju betona. Treba istaknuti da je volumenska masa recikliranoga agregata manja od volumenske mase prirodnog agregata u prosjeku za 10 % [9, 17].

### 3 Neka od istraživanja samozbijajućeg betona s udjelom recikliranog agregata

Prashant O. Modani i Vinod M. Moitkar (2014.) ispitivali su primjenu agregata kod SCC betona. U ovom istraživanju reciklirani je krupni agregat upotrijebljen pri proizvodnji samozbijajućega betona uz varijaciju količine prirodnog krupnog agregata od 0 % do 100 % s povećanjem od 20 %. Cilj je ovog istraživanja pokušaj ispitivanja utjecaja recikliranoga agregata na čvrstoću, vodonepropusnost, otpornost na djelovanje kiseline, prodiranje klorida te alkalnost samozbijajućeg betona.

Rezultati su pokazali da se reciklirani agregat može upotrijebiti u proizvodnji SCC betona bez značajnoga smanjenja njegove čvrstoće i trajnosti. Dokazano je da se uporabom recikliranog agregata u betonu doprinosi zaštiti okoliša i održivom razvoju.

Oussama Kebaili, Michel Mouret, Nourredine Arabi i Franck Cassagnabere (2015.) proveli su ispitivanje radi pronalaska najboljeg načina primjene recikliranoga krupnog agregata u proizvodnji SCC s nastojanjem da se smanji uporaba prirodnih agregata koji spadaju u neobnovljive izvore. Razlika recikliranoga i prirodnog agregata je u tome što reciklirani ima manju gustoću, veći kapacitet upijanja vode i uglati oblik.

Također je ispitan i utjecaj primjene krupnoga recikliranog agregata umjesto prirodnog krupnog agregata. Reciklirani agregat je zamijenjen u količini od 40 %, 60 % i 100 %. Količina je vode odabrana tako da bude omogućena apsorpcija unutar 24 satne apsorpcije RCA. Odmah nakon miješanja u svježem stanju za SCC ispitana su ključna svojstva propisana europskim normama i preporukama, primjerice:

- sposobnost popunjavanja,
- tečenje i otpornost segregaciji,
- svojstvo smicanja.

Eksperimenti su pokazali sljedeće:

- kriterij ugradljivosti SCC betona nije postignut bez obzira što je prirodni agregat zamijenjen recikliranim,
- zamjenom su poboljšana reološka svojstva betona.

Abdurrahman Lotfy i Mahmoud Al-Fayez (2014) objavili su rezultate ispitivanja svježega betona, mehaničkih i trajnosnih svojstava betona koji je proizveden uporabom kvalitetnoga recikliranog agregata prema kanadskim normama (CSA). Napravljeno je ukupno sedam mješavina betona s vodocementnim omjerom 0,40 i udjelom recikliranog agregata od 10 %, 20 % i 30 % te udjelom finog i krupnog agregata od 10 % i 20 %. Sve su ove mješavine ispitane i uspoređene s dvije mješavine koje su nisu sadržavale reciklirani agregat. Sve mješavine su zadovoljile zahtjeve za samozbijajući beton u svježem stanju, te su zadovoljile i u pogledu mehaničkih i trajnosnih svojstava. Mješavina s krupnim recikliranim agregatom pokazala se boljom od sitnoga recikliranog agregata u pogledu čvrstoće na savijanje i čvrstoće na cijepanje, skupljanja, apsorpcije vode i propusnosti klorida.

## 4 Buduća istraživanja

Samozbijajući beton (SCC) koji se spravlja na gradilištu projektira se tako da bude ugradljiv i zadovoljavajućih svojstava. Poznate su metode ispitivanja kojima se dokazuje praktična primjenjivost ovog betona. Sljedeći bi korak mogao biti brži način proizvodnje SCC betona. SCC beton bi trebalo u budućnosti promatrati kao običan, a ne kao poseban beton. Trebo bi uspostaviti racionalan i kvalifikacijski sustav za inženjere da bi se ovakav beton mogao proizvoditi. Ovdje je bitno da kod inženjera postoji svijest o značenju recikliranja građevinskog otpada. Recikliranje bi morala biti obaveza, a tvornice za reciklažu treba posjedovati svaka zemlja. Bitno je napomenuti da svaka tvornica za reciklažu građevinskog otpada mora posjedovati ISO 9001. Znanstveno istraživanje koje će se provesti u sklopu doktorskog rada moglo bi ići u smjeru - Ispitivanja volumenskih deformacija samozbijajućega betona spravljenog s recikliranim agregatom od starog betona:

- Eksperimentalna ispitivanja puzanja samozbijajućeg betona spravljenog s recikliranim agregatom od starog betona,
- Eksperimentalno ispitivanje skupljanja samozbijajućeg betona spravljenog s recikliranim agregatom od starog betona.

## 5 Zaključak

Može se reći da su reciklirani agregati našli svoje mjesto u svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Za primjenu recikliranog agregata kod nosivih armiranobetonskih elemenata još se provode istraživanja te se utvrđuje kvaliteta recikliranoga agregata kako bi se mogao primjenjivati kao agregat za proizvodnju samozbijajućih betona kod nosivih konstrukcijskih elemenata. Tehnološki je moguće za velik broj slučajeva proizvesti prihvatljiv i kvalitetan beton od recikliranoga agregata. Ekonomično je proizvoditi reciklirane agregate za nenosive ili samonosive predgotovljene betonske elemente iz sustava ocjenjivanja sukladnosti 4 (npr. ploče za popločavanje, opločnici, rubnjaci, betonska galanterija i slično). Za konstrukcijsku primjenu za koju je dokazana njegova prikladnost zahtjeve i način kontrole treba definirati u projektu konstrukcije i/ili u posebnoj normi.

## Literatura

- [1] Okamura, H., Ouchi, M.: Self-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1 (2003) 1, pp. 5-15.
- [2] FIB Task Group 3.3 (2004); *Environmental Design*, International Federation for Structural Concrete, fib, Lausanne, Switzerland, pp. 74
- [3] Chun, L.P., Scorpio, D.E., Kibert, C.J.: Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations, *Journal of Construction Management and Economics*, 15 (1997) 1, pp. 49 - 58.
- [4] Aggarwal, P., Siddique, R., Aggarwal, Y., Gupta, S.M.: Self Compacting Concrete - Procedure for Mix Design, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, June 2008
- [5] Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I.: Betoni na bazi recikliranog agregata - tehnologija, svojstva i primena, *Konferencija Graditeljstvo i održivi razvoj, DIMK Srbije*, pp. 131-154, 2009.
- [6] Dhiyaneshwaran, S., Ramanathan, P., Bhaskar I., Venkatasubramania, R.: Study on durability characteristics of Self compacting concrete with fly ash, *Jordan Journal of Civil Engineers*, 7 (2013) 3, pp. 342-353.
- [7] Tam V.W.Y., Gaob, X.F., Tam, C.M.: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and concrete research*, 35 (2005) 6, pp. 1195-1203.

- [8] Dumne, S.M.: Effect of Super plasticizer on fresh and hardened properties of Self compacting concrete containing fly ash, *American Journal of Engineering Research*, 3 (2014) 3, pp. 205-211.
- [9] Dubey, R., Kumar, P.: Effect of Super Plasticizer Dosage on Compressive Strength of Self Compacting Concrete, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3 (2012) 2, pp. 360-366.
- [10] Mohamed, A.H.: Effect of Fly ash and Silica fume on Compressive Strength of Self Compacting Concrete under different conditions, *Ain Shams Journal*, 2(2011) 2, pp. 79-86.
- [11] EFNARC (2002), *Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete*.
- [12] IS: 10262 (2009), *Guidelines for concrete mix design*.
- [13] IS: 383 (1970), *Specifications for coarse and fine aggregates*.
- [14] Brouwers, H.J.H., Radix, H.J.: Self-Compacting Concrete: Theoretical and Experimental study, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 2116-2136.
- [15] Hansen, T.C., Narud, H.: Strength of recycled concrete made from concrete coarse aggregate, *Concrete International - Design and Construction*, 5 (1983) 1, pp. 872-877.
- [16] Hameed, A.H.: Effect of Superplasticizer Dosage on Workability of Self compacting concrete, *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 5 (2012) 2, pp. 66-81.
- [17] Poon, C.S., Lam, C.S.: The effect of aggregate to cement ratio and types of aggregates on properties of precast concrete blocks, *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008) 4, pp. 283-289.
- [18] Uysal, M., Yilmaz, K.: Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33 (2011), pp. 771-776.
- [19] Skazlić, M., Vujica M.: Samozbijajući ekološki prihvatljivi betoni. *GRAĐEVINAR*, 64 (2012) 9, pp. 905-913.
- [20] Bjegović, D., Štirmer, N.: *Teorija i tehnologija betona*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [21] Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S.: Mogućnosti primene starog betona kao nove vrste agregata u savremenom građevinarstvu, *Zaštita materijala*, 51 (2010) 3, pp. 178-188.

# Određivanje mehaničkih karakteristika tla pomoću statičkog penetracijskog pokusa

Gordana Ivoš<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, *givos@grad.hr*

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, *msk@grad.hr*

## Sažetak

Statički penetracijski pokus (CPT) jedna je od najčešće rabljenih metoda ispitivanja tla in situ koja omogućava dobivanje kontinuiranih podataka o tlu po dubini. Parametri dobiveni statičkim penetracijskim pokusom mogu se upotrijebiti za dobivanje parametara tla. U radu su prikazane postojeće korelacije između odabranih parametara tla te parametara koji se dobivaju statičkim penetracijskim pokusom (otpor na šiljku, trenje na plaštu). Prikazana su i dosadašnja istraživanja na području Hrvatske i uspostavljene korelacije za klasifikaciju tla pomoću CPT-a na području sjeverne Hrvatske.

*Ključne riječi: statički penetracijski pokus, parametri tla, korelacije, nedrenirana čvrstoća, kut trenja*

## Determination of mechanical properties of soil using cone penetration test

### Abstract

The cone penetration test (CPT) is one of the most common site investigation methods enabling continuous soil data retrieval along the depth. The information obtained by cone penetration test can be used in the evaluation of soil parameters. Correlations between selected soil parameters, and parameters obtained by static penetration test (cone resistance, sleeve friction), are presented in the paper. Relevant research conducted so far in Croatia is presented, and new correlations for the CPT-based classification of soil in northern Croatia are proposed.

*Key words: cone penetration test, soil parameters, correlations, undrained shear strength, angle of friction*



## 1 Uvod

Ponašanje tla ovisi o većem broju parametara. Dobivanje mehaničkih parametara tla važan je zadatak u geotecnici i geotecnikom projektiranju. Statički penetracijski pokus (CPT) jedna je od metoda ispitivanja tla *in situ* koja ima mnoge prednosti. Neke od njih su: omogućava brzo i ekonomično ispitivanje, rezultati ispitivanja koji se dobivaju vezani su uz neporemećeno tlo na terenu u njegovim prirodnim uvjetima, dobivaju se kontinuirani podaci po dubini, postoje jake teorijske osnove za interpretaciju rezultata. Prilikom ispitivanja CPT-om može se mjeriti i porni tlak, pa je riječ o CPTU ispitivanju. Prilikom ispitivanja kontinuirano se mjere podaci o otporu na šiljku sonde, trenju na plaštu i pornom tlaku. Ti se podaci mogu upotrijebiti odvojeno ili zajedno kako bi se dobili parametri tla.

## 2 Statički penetracijski pokus

### 2.1 Općenito o CPT-u

Statički penetracijski pokus (CPT - *Cone Penetration Test*) jedna je od najčešće primjenjivanih metoda ispitivanja tla *in situ* koja omogućava dobivanje kontinuiranih podataka o tlu po dubini. Ispitivanje se provodi tako da se u tlo utiskuje posebna sonda određenom brzinom (standardna brzina penetracije je 20 mm/s) te se prilikom utiskivanja konstantno mjeri otpor utiskivanju na šiljku sonde ( $q_c$ ) i trenje na plaštu sonde ( $f_c$ ) koje se prilikom utiskivanja sonde aktivira između plašta i okolnog tla. Rezultati ispitivanja nisu osjetljivi na mala odstupanja od standardne brzine (-2 mm/s) [1]. Podaci se prikupljaju kontinuirano po dubini, uglavnom na razmacima od 25 do 50 mm, s tim da je to najčešće svakih 50 mm. Prilikom ispitivanja se, osim otpora utiskivanju na šiljku sonde i trenja na plaštu sonde, mogu mjeriti i porni tlak (CPTU), temperatura u okolini sonde te se prikupljati podaci o seizmičkim valovima (SCPT). Statički penetracijski pokus u geotecnici se najčešće rabi za određivanje profila tla i identifikaciju pojedinih slojeva tla, određivanje mehaničkih i fizikalnih karakteristika tla, određivanje parametara tečenja i konsolidacije tla te indikaciju osjetljivosti tla na likvefakciju. CPT je moguće upotrijebiti za širok spektar vrsta tla, od gline do pijeska, a primjenom šiljaka velike površine (40 cm<sup>2</sup>) može se vršiti ispitivanje čak i u šljuncima.

Prednosti su statičkog penetracijskog pokusa: brzo i kontinuirano određivanje profila tla, ponovljivost i pouzdanost mjerenja, ekonomičnost i produktivnost, jake teorijske osnove za interpretaciju. Nedostaci su statičkog penetracijskog pokusa: potrebna su velika početna ulaganja, potrebni su vješti operatori, ne vadi se uzorak tla, ispitivanje je ograničeno u šljuncima i cementiranim tlima [1, 2].

## 2.2 Parametri dobiveni ispitivanjem

Prilikom ispitivanja statičkim penetracijskim pokusom u kojem se mjeri i porni tlak konstantno se očitavaju vrijednosti [1, 2]:

- $q_c$  - otpor na šiljku sonde koji se dobiva kao naprezanje koje je omjer ukupne uzdužne sile na šiljak i površine poprečnoga presjeka (baze) šiljka. Ako se mjeri porni tlak, zbog tehnologije ugradnje mjerača tlaka u sondu pojavljuje se dodatni otpor na šiljku, pa je u koherentnim materijalima potrebno korigirati otpor na šiljku,  $q_c$ , zbog porasta pornog tlaka [1]:

$$q_t = q_c + u_2 (1-a) \quad (1)$$

gdje su  $q_t$  - korigirani otpor na šiljku,  $q_c$  - izmjereni otpor na šiljku,  $u_2$  - izmjereni porni tlak i  $a$  - koeficijent neto površine šiljka dobiven kalibracijom u laboratoriju (u vrijednostima 0,70-0,85),

- $f_s$  - trenje na plaštu sonde koje se dobiva kao omjer ukupne sile trenja koja se javlja na kontaktu plašta sonde i tla te razvijene površine plašta,
- $u$  - porni tlak koji predstavlja zbroj *in situ* pornoga tlaka ( $u_0$ ) i porasta pornog tlaka ( $\Delta u$ ) zbog utiskivanja šiljka u tlo.

## 3 Dosadašnja ispitivanja u Hrvatskoj

Identifikacija tipa pojedinih slojeva tla jedna je od važnih primjena CPT-a u geotehnici. Za klasifikaciju tla na temelju rezultata CPT-a postoje empirijski dobivene tablice. Za razliku od klasificiranja tla na temelju laboratorijskih ispitivanja koje se vrši na poremećenim uzorcima, rezultati CPT-a vezani su za mehaničko ispitivanje neporemećenoga tla *in situ*. Rezultati klasificiranja dobivenih pomoću dijagrama za klasifikaciju iz rezultata CPT-a i rezultati laboratorijskih klasifikacija prilično se dobro podudaraju, jer su parametri tla koji se rabe u laboratorijskim klasifikacijama relativno dobro povezani s mehaničkim ponašanjem tla [2, 3].

Na području sjeverne Hrvatske na pet lokacija provedena su CPT ispitivanja na temelju kojih su uspostavljene korelacije za klasifikaciju tla pomoću CPT-a [2], dok je na jednoj lokaciji provedena verifikacija dobivenih klasifikacija. Nakon toga su dobivene korelacije koje uključuju svih šest lokacija. Lokacije s kojih su dostupni podaci ispitivanja su:

- kanal za navodnjavanje Biđ-Bosutskog polja (75 parova laboratorij/CPT),
- luka Ilok (36 parova laboratorij/CPT),
- klizište Krsišće (20 parova laboratorij/CPT),
- klizište Mirogoj (25 parova laboratorij/CPT),
- klizište Krematorij (60 parova laboratorij/CPT),
- klizište Veliki vrh (19 parova rezultata laboratorij/CPT).

Prema postojećim se korelacijama za klasificiranje tla rabe četiri grupe parametara. Prva se grupa sastoji od jednog parametra. On predstavlja podatak o tome sadrži li uzorak tla koje se ispituje organske tvari. Druga se grupa sastoji od tri parametra. Oni predstavljaju postotne udjele mase šljunka, pijeska i sitnih čestica u ukupnoj masi tla. Treća se grupa sastoji od dva parametra, koeficijenta jednoličnosti  $c_u$  i koeficijenta zakrivljenosti  $c_c$ . Ti parametri karakteriziraju granulometrijsku krivulju. Četvrta se grupa sastoji od dva parametra, granice tečenja  $w_L$  i indeksa plastičnosti  $I_p$ . Ta dva parametra karakteriziraju plastična svojstva tla. Za sve su te parametre izvedene korelacije s CPT ispitivanjem na temelju dostupnih rezultata ispitivanja [2].

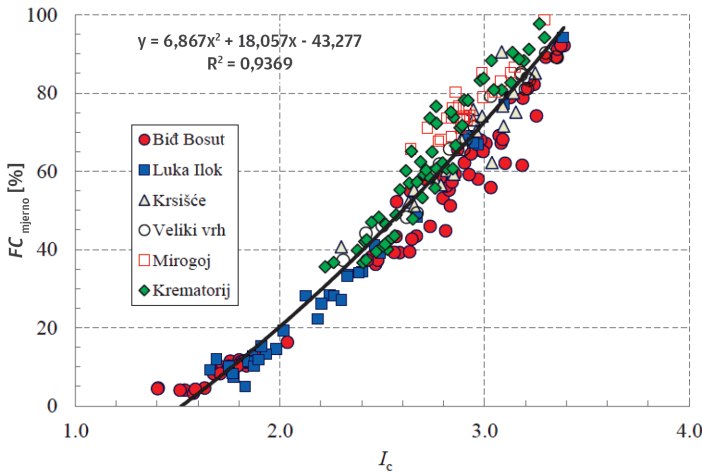
Za prvih pet navedenih lokacija uspostavljene su korelacije, a nakon toga i za svih šest lokacija zajedno, između tipa ponašanja tla  $I_c$  i postotaka sitnih čestica FC, granice tečenja  $w_L$ , granice plastičnosti  $I_p$ , koeficijenta jednoličnosti  $c_u$  i koeficijenta zakrivljenosti  $c_c$ . Baza ispitivanja sastojala se od 216 parova rezultata laboratorijskih ispitivanja i CPT ispitivanja. Za verifikaciju rezultata upotrijebljeno je 19 parova, što ukupno čini dostupnu bazu od 235 parova rezultata laboratorijskih ispitivanja i CPT ispitivanja.

Uspostavljene korelacije za dobivanje postotaka sitnih čestica FC, granice tečenja  $w_L$  i indeksa plastičnosti  $I_p$  preporučene su za daljnju uporabu. U tablici 1. prikazane su nove korelacije za klasifikaciju tla pomoću CPT-a za područje sjeverne Hrvatske dobivene na osnovu 235 parova ispitivanja u laboratoriju i CPT-om.

Tablica 1. Nove korelacije za klasifikaciju tla pomoću CPT pokusa na području sjeverne Hrvatske [2]

Korelacija	$I_c$
$FC=6,8673 \cdot I_c^2 + 18,057 \cdot I_c - 43,277$	1,402 - 3,389
$w_L=18,334 \cdot I_c^2 + 67,079 \cdot I_c + 86,631$	2,126 - 3,389
$I_p=16,109 \cdot I_c^2 + 65,783 \cdot I_c + 79,428$	2,126 - 3,389

Na slici 1. prikazan je grafički primjer uspostavljene korelacije - korelacija indeksa tipa ponašanja  $I_c$  i postotka sitnih čestica FC za područje sjeverne Hrvatske.



Slika 1. Korelacija indeksa tipa ponašanja tla  $I_c$  i postotaka sitnih čestica FC za područje sjeverne Hrvatske [2]

## 4 Određivanje parametara tla iz rezultata CPT-a

Rezultate ispitivanja statičkim penetracijskim pokusom moguće je interpretirati primjenom različitih metoda (teorijskih, analitičkih, statističkih) kako bi se dobile fizičke i mehaničke karakteristike tla. U parametre tla spadaju zapreminska težina tla, relativna gustoća, kut trenja, kut dilatacije, pritisak prekonsolidacije, nedrenirana čvrstoća, koeficijent bočnog tlaka, modul elastičnosti, propusnost tla [5].

### 4.1 Nedrenirana čvrstoća tla

Nedrenirana čvrstoća tla predstavlja najveće posmično naprezanje u tlu prilikom smicanja u nedreniranim uvjetima. Nedrenirana posmična čvrstoća ovisi o smjeru opterećenja, anizotropiji tla, stanju naprezanja i povijesti opterećenja. Upotrebljava se za procjenu krutosti tla, jer se provodi na neporemećenim uzorcima. Kao veza otpora na šiljku i nedrenirane čvrstoće dobiven je sljedeći izraz, prema [6]:

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (2)$$

gdje je:

$c_u$  – nedrenirana čvrstoća tla [ $\text{kN/m}^2$ ],

$q_t$  – otpor na šiljku [ $\text{kN/m}^2$ ],

$\sigma_v$  – ukupno vertikalno naprezanje [ $\text{kN/m}^2$ ],

$N_{kt}$  – bezdimenzionalni parametar ovisan o tipu ispitivanja, varira u granicama od 10 do 20, prosječno iznosi 14.

## 4.2 Kut trenja tla

Kut unutarnjega trenja tla u velikom dijelu utječe na ponašanje tla prilikom opterećenja, kao i na njegovo početno stanje naprezanja. Kulhawy i Mayne [7] ustanovili su izraz za određivanje kuta trenja pijesaka:

$$\phi = 17,6^\circ + 11,0 \log(q_{tt}) \quad (3)$$

pri čemu se  $q_{tt}$  dobiva pomoću izraza:

$$q_{tt} = (q_t / \sigma_{atm}) / (\sigma'_{vo} / \sigma_{atm})^{0,5} \quad (4)$$

gdje su:

$q_t$  - otpor na šiljku [kN/m<sup>2</sup>],

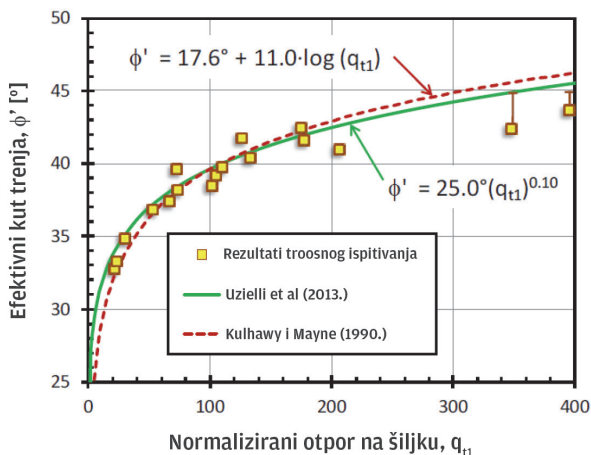
$\sigma_{atm}$  - atmosferski tlak [kN/m<sup>2</sup>],

$\sigma'_{vo}$  - efektivno vertikalno naprezanje u tlu [kN/m<sup>2</sup>].

Navedeni su izraz korigirali Uzielli i ostali [8]:

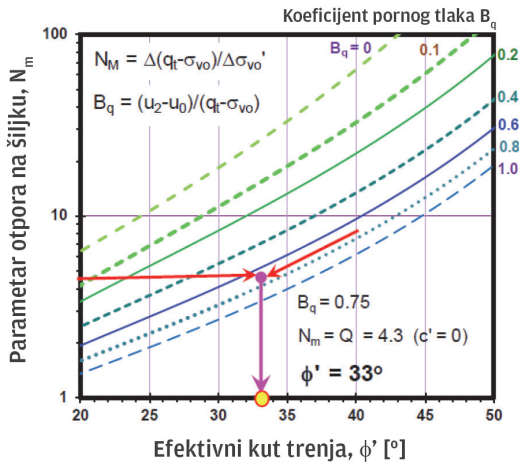
$$\phi = 25,0^\circ (q_{tt})^{0,10} \quad (5)$$

Usporedni prikaz obje metode vidljiv je na slici 2.



Slika 2. Ovisnost kuta unutarnjeg trenja ( $\phi$ ) o otporu na šiljku ( $q$ ) [5]

Kut trenja glina i prahova može se prema Sandven i Watn [9] dobiti pomoću NTH metode koja je prikazana na slici 3.



Slika 3. Metoda procjene vrijednosti efektivnog kuta trenja u prahovima i glinama [5]

Za procjenu efektivnoga kuta trenja primjenjuje se parametar  $N_m$  definiran izrazom [9]

$$N_m = \frac{N_q - 1}{1 + N_u \cdot B_q} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0} + a'} \quad (6)$$

gdje je:

- $a' = c' \cdot \text{ctg } \phi$ , pri čemu je  $a' = 0$  ako je  $c' = 0$ , gdje je  $c'$  efektivna kohezija u tlu [ $\text{kN/m}^2$ ],
- $\sigma_{v0}$  - ukupno vertikalno naprezanje u tlu [ $\text{kN/m}^2$ ],
- $\sigma'_{v0}$  - efektivno vertikalno naprezanje u tlu [ $\text{kN/m}^2$ ],
- $q_t$  - otpor na plaštu [ $\text{kN/m}^2$ ].

## 5 Zaključak

Statički penetracijski pokus je metoda ispitivanja tla *in situ* koja ima mnoge prednosti u odnosu na tradicionalne metode ispitivanja. Prednosti su ispitivanja CPT-om jednostavnost i brzina izvedbe, ekonomičnost i ponovljivost. Rezultati ispitivanja kontinuirano se bilježe, odnosno, mogu se dobiti gotovo neprekinuti podaci po dubini tla, a tumačenje rezultata ima snažnu teorijsku osnovu.

Parametri koji se mjere prilikom ispitivanja (otpor na šiljku sonde, trenje na plaštu i porni tlak) mogu se upotrijebiti odvojeno ili zajedno kako bi se dobili parametri važni za geotehničke inženjere.

Pomoću indeksa ponašanja tla  $I_c$  izvedene su nove korelacije za postotak sitnih čestica FC, granicu tečenja  $w_L$  i indeks plastičnosti  $I_p$  za područje sjeverne Hrvatske za ukupno 235 dostupnih parova ispitivanja laboratorij/CPT.

Budući da se indeks ponašanja tla preporučuje za izradu korelacija rezultata CPT-a i karakteristika tla, može se istražiti povezivanje navedenog parametra s drugim fizičko-mehaničkim karakteristikama tla.

U budućem je istraživanju cilj uspostaviti korelacije između rezultata statičkog penetracijskog pokusa i odabranih parametara tla po uzoru na postojeće korelacije za područje sjeverne Hrvatske.

## Literatura

- [1] Robertson, P.K., Cabal, K.L.: *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*, Gregg Drilling & Testing, Inc., 2<sup>nd</sup> Edition, 2007.
- [2] Librić, L.: Klasifikacija tla zasnovana na rezultatima statičkog penetracijskog pokusa, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2016.
- [3] Robertson, P.K.: Soil classification using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), pp. 151-158, 1990.
- [4] Mayne, P.W., Peuchen, J.: Unit weight trends with cone resistance in soft to firm clays, *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 4*, Vol. 1 (Proc. ISC-4, Pernambuco), CRC Press, London, pp. 903-910, 2012.
- [5] Mayne, P.W.: KN2: Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests, *3<sup>rd</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'14)*, (ur. Robertson, P.K.), Cabal, K.I., ISSMGE Technical Committee TC 102, Las Vegas, pp. 47-73, 2014.
- [6] Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M.: *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic/London, Routledge, New York, pp. 312, 1997.
- [7] Kulhawy, F.H., Mayne, P.W.: *Estimating Soil Properties for Foundation Design*, EPRI Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, pp. 306, 1990.
- [8] Uzielli, M., Mayne, P.W., Cassidy, M.J.: Probabilistic assessment of design strengths for sands from in-situ testing data, *Modern Geotechnical Design Codes of Practice*, Advances in Soil Mechanics & Geotechnical Engineering (series), Vol. 1, IOS-Millpress, Amsterdam, pp. 214-227, 2013.
- [9] Sandven, R., Watn, A.: Theme lecture: interpretation of test results. Soil classification and parameter evaluation from piezocone tests, Results from Oslo airport, *Proc. Intl. Symposium on Cone Penetration Testing*, Vol. 3, Swedish Geotechnical Society Report SGF 3:95, Linköping, pp. 35-55, 1995.

# Numeričko modeliranje svodnoga djelovanja u nosivim platformama od armiranog tla

Jelena Kaluđer<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet, *jkaluder@gfos.hr*

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

## Sažetak

Kod visokih se nasipa na slabo nosivom tlu slijeganja i deformacije nasipa mogu smanjiti primjenom pilota sa slojem armiranoga tla na njihovim glavama. Takva je konstrukcija poznata kao nosiva platforma. Prijenos sila iz nasipa na nosivu platformu temelji se na svodnom djelovanju. Geomreže ugrađene u dio nasipa odmah povrh pilota membranskim djelovanjem i oslanjanjem na pilote ostvaruju uvjet za razvoj svodnoga djelovanja te smanjuju slijeganje nasipa. Armiranjem tla u nasipu geomrežom reduciraju se opterećenja koja mogu uzrokovati slom tla posmikom ili mogu uzrokovati prekomjerne deformacije. Jedna je od numeričkih metoda kojima se omogućava simulacija svodnoga djelovanja i daje dobar uvid u mehanizam prijenosa opterećenja metoda diskretnih elemenata (MDE).

*Ključne riječi: nosiva platforma, svodno djelovanje, numeričko modeliranje*

## Numerical modelling of arching effect in reinforced-earth load transfer platforms

### Abstract

The rate of settlement and deformation of high embankments on soft subsoil can be reduced by means of a reinforced earth structure over piles. This structure is known as the load transfer platform. The transfer of forces from the embankment onto the load transfer platform is based on arching effect. Geogrids installed in soil over piles create conditions for arching effect with their membrane effect and by leaning onto piles, and thus the embankment settlement is reduced. Loads that can lead to shear failure of soil or excessive deformations are reduced by reinforcement of embankment soil with geogrids. One of the numerical methods that enable simulation of arching effect and provide a good insight into the load transfer mechanism is the Discrete Element Method (DEM).

*Key words: load transfer platform, arching effect, numerical modelling*



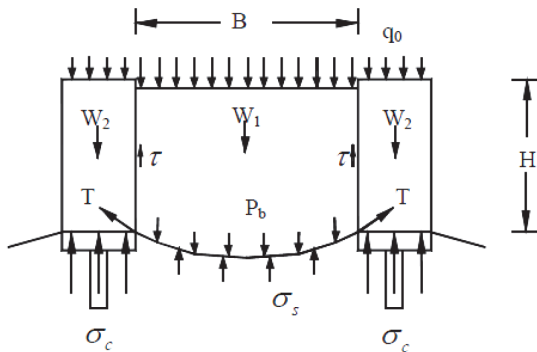
## 1 Uvod

Nosive platforme od armiranoga tla učinkovito su rješenje problema temeljenja na slabonosivom tlu koje se odlikuje prekomjernom stišljivošću, nedovoljnom nosivosti te dugotrajnim konsolidacijskim slijeganjem [1-7]. Konceptija nosive platforme podrazumijeva sloj nekoherentnoga tla ograničene visine armiran geomrežom položenom na pilote koji opterećenje nasipa prenose na čvrstu podlogu. Geosintetik premošćuje udaljenost između pilota i omogućuje nastanak mehanizma prijenosa opterećenja, koji je kombinacija svodnoga djelovanja tla i membranskog djelovanja geosintetika [8-10]. Konstrukcija armiranoga tla projektirana je tako da osigura prijenos opterećenja na pilote preraspodjelom opterećenja unutar ojačane strukture tla zahvaljujući velikoj vlačnoj čvrstoći geosintetika i spriječi učinak probijanja na kontaktu pilota i nasipa. Za izradu nosivih platformi, kod kojih je nasip izveden od koherentnog materijala, prihvatljivi geosintetik je i tkani geotekstil visoke vlačne čvrstoće, jer se smatra da nema utjecaja interlockinga (uklještenja zrna). Kod nekoherentnoga nasipa utjecaj uklještenja značajan je, jer zrna djelomično prodiru između rebara geomreže u kojima se stvara prednapetost, koja rezultira povratnim tlačnim horizontalnim naprezanjima na zrna agregata. Prihvatljivi geosintetik u tom je slučaju geomreža. U sloju zbijenoga zrnatog materijala pojačanog geomrežom, koja se nalazi između tijela nasipa i pilota, geomreža ima trostruku funkciju: da poveća koncentraciju tlačnoga opterećenja na pilote, da zadrži i poništi horizontalni potisak na stranice nasipa te da odvoji nasip od temeljnog tla [11]. Geomreže djeluju kao membrane te moraju biti otporne na puzanje, a projektna čvrstoća nosive platforme mora biti dovoljna da spriječi deformacije i slijeganje temeljnog tla koje može uzrokovati slom pilota kojima se opterećenja prenose u čvršće slojeve tla. Geometrijske veličine, razmak na koji se vertikalni piloti nosivih platformi postavljaju te visina strukture armiranog nasipa, definirani su svojstvima temeljnoga tla, izvedbom platforme i zahtjevima za ograničenim deformacijama, sve u skladu s propisanim projektnim smjernicama i normama prema kojima se provodi projektiranja.

## 2 Mehanizam prijenosa opterećenja i projektne metode

Nosive platforme od armiranoga tla sva opterećenja nasipa prenose putem točkastih ili linearnih vertikalnih potpornih nosivih elemenata - pilota na čvrstu podlogu na određenoj dubini. Piloti mogu biti kvadratnog ili okrugloga poprečnog presjeka i postavljeni u pravilnu pravokutnu ili trokutnu mrežu. Za premošćivanje prostorne udaljenosti između pilota dodana je potpora horizontalnim ojačanjem geosintetikom, čime se dobiva konstrukcija armiranoga tla. Konstrukcija armiranoga tla projektirana je tako da osigura prijenos opterećenja na pilote preraspodjelom opterećenja unutar ojačane strukture tla i spriječi učinak probijanja. Prijenos opterećenja s nasipa na pilote, koji dalje to opterećenje prenose na čvrstu podlogu, posljedica je mehanizma svodnog djelovanja

uvjetovanog različitom krutosti pilota i temeljnog tla između pilota. Mehanizam prijenosa opterećenja nosive platforme od armiranoga tla prikazan je na slici 1.



Slika 1. Mehanizam prijenosa opterećenja nosive platforme od armiranoga tla [12]

Objašnjenje oznaka:  $\sigma_c$  - normalno naprezanje zbog reakcije pilota ispod geosintetika,  $\sigma_s$  - normalno naprezanje zbog reakcije tla ispod geosintetika,  $\tau$  - tangencijalno (posmično) naprezanje tla,  $W_2$  - težina tla nasipa na glavu pilota (opterećenje tla koje preuzima pilot),  $W_1$  - težina tla nasipa na geosintetik (opterećenje tla koje preuzima geosintetik),  $T$  - naprezanje (vlačno) u geosintetiku,  $B$  - svijetli razmak između glava pilota,  $H$  - visina nasipa,  $q_0$  - kontinuirano opterećenje nasipa,  $P_b$  - izvijajuće djelovanje tla na geosintetik,  $P_b = \rho (\gamma H + q_0)$ .

## 2.1 Svodno djelovanje

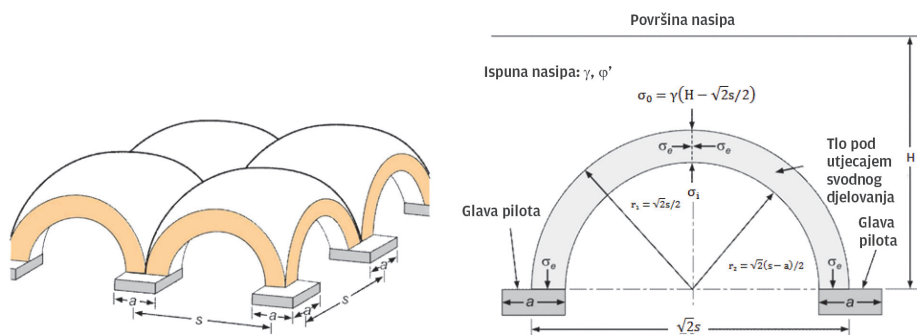
Svodno djelovanje jedan je od ključnih čimbenika mehanizma prijenosa opterećenja i javlja se kao rezultat posmičnih naprezanja nastalih zbog diferencijalnoga slijeganja ispune nasipa između pilota. Prema [8] svodno djelovanje rezultat je prijenosa tlakova između tla koje se nalazi između dva pilota i krutih pilota, dok je prema [13] svodno djelovanje sposobnost materijala da prenese opterećenje koje se javlja između dva pilota kao odgovor na relativni pomak između te dvije točke. Isti autor uvodi bezdimenzionalni termin koeficijent svodnoga djelovanja, koji izražava kao

$$q = \frac{P_r}{\gamma \cdot H + q} \quad (1)$$

gdje su:  $P_r$  - tlačno djelovanje na geosintetik,  $\gamma$  - jedinična težina materijala nasipa,  $H$  - visina nasipa,  $q$  - kontinuirano opterećenje nasipa. Svodnoga djelovanja nema u slučaju kada je  $\rho = 1$ , a kada je  $\rho = 0$ , svodno djelovanje je potpuno.

Pojednostavljena pretpostavka svodnoga djelovanja u tlu nasipa vizualizira oblik raspodjele opterećenja. Ovisno o autoru metode projektiranja nosive platforme svodno

djelovanje može imati oblik piramide, kupole ili polusfere. Na slici 2. prikazan je model svodnoga djelovanja po metodi Hewlett and Randolph.



Slika 2. Mehanizam prijenosa opterećenja nosive platforme od armiranog tla [14]

Iako su mnoga provedena istraživanja [15-20] potvrdila da se mehanizam prijenosa opterećenja temelji na svodnom djelovanju, kao i da svodno djelovanje smanjuje horizontalna naprezanja na tlo između pilota te koncentraciju horizontalnoga naprezanja iza pilota [21], sam mehanizam prijenosa još uvijek nije potpuno shvaćen [22-25].

## 2.2 Projektne metode

Projektiranje nosive platforme od armiranoga tla uključuje izračun visine nasipa čije se opterećenje prenosi na pilot svodnim djelovanjem te dijela opterećenja koje trebaju preuzeti geosintetik i temeljno tlo. Ulazne projektne veličine su parametri izvođenja: dopuštena ukupna i diferencijalna slijeganja, faktori sigurnosti za stabilnost i bočno širenje, faktori umanjenja sigurnosti za geosintetik za oštećenje, propadanje i puzanje; parametri materijala: svojstva pilota (tlačna čvrstoća, savojna čvrstoća, krutost, dopušteno opterećenje), svojstva nosive platforme (jedinična težina, kut trenja, modul elastičnosti, Poissonov koeficijent); svojstva materijala nasipa (jedinična težina, kut trenja, modul elastičnosti, koeficijent tlaka tla, Poissonov koeficijent); svojstva geosintetika (granična vlačna čvrstoća, kut trenja, krutost, dopustiva proračunska čvrstoća i koeficijent interakcije tla i geosintetika); parametri opterećenja (prometno opterećenje, opterećenje nasipa); parametri geometrije: razmak pilota, promjer pilota, raspored pilota, visina nasipa, nagib nasipa, broj slojeva geosintetika) te parametri temeljnoga tla: jedinična težina, Poissonov koeficijent, faktor sigurnosti za bočno širenje, koeficijent trenja između tla i pilota, dubina nosećeg sloja i dubina do razine podzemne vode.

Za prikazivanje odnosa djelovanja opterećenja nasipa na pilote, površinu tla između pilota kao i ukupnoga opterećenja nasipa izračunavaju se sljedeće vrijednosti u svim projektним metodama: koeficijent koncentracije naprezanja ( $n$ ), definiran kao omjer

vertikalnog naprezanja na glavu pilota i vertikalnog naprezanja na tlo; koeficijent smanjenja naprezanja (SSR), definiran kao omjer naprezanja tla između pilota i naprezanja nadsloja; koeficijent naprezanja pilota (CSR), definiran odnosom naprezanja koje preuzima glava pilota i naprezanja nasipa; učinkovitost (E), definirana udjelom težine nasipa koji piloti prenose na temeljno tlo.

Od početka primjene nosivih platformi od armiranoga tla do danas razvijeno je nekoliko projektnih metoda proračuna, kao što su Guido (1987.), Hewlett i Randolph (1988.), Carlsson (1987.), Russell i Pierpoint (1997), Russell (2003.), Collin (2004.), Kempfert (2004.), Abusharar (2009.) (čija se metoda temelji na svodnom djelovanju procjenom magnitude njegova djelovanja i proračuna naprezanja u slojevima ojačanja geosintetikom), BS 8006 (1995., 2010.), EBGeo (2010.), CUR 226 (2010.) [26–36]. Metode se međusobno razlikuju po tome uzimaju li prometno opterećenje nasipa u obzir, jesu li karakteristike tla bitne za proračun, načinu prikaza modela svodnoga djelovanja (kupola, polusfera, piramida), broju slojeva geomreže, kritičnoj udaljenosti pilota te primjeni koeficijenta smanjenja naprezanja na cjelokupnu nosivu platformu ili samo na glavu pilota i tjeme kupole.

### 3 Numeričko modeliranje

Numeričko modeliranje u geotecnici složen je postupak simulacije fizikalnih procesa, efektivnih naprezanja, dreniranih i nedreniranih analiza. Analiza ponašanja tla numeričkim modeliranjem moguća je na dva načina. Prva analiza provodi se na temelju raspoloživih podataka o tlu, a numeričkim se modeliranjem predviđa ponašanje geotehničke konstrukcije. Druga je analiza u kojoj su poznati podaci o tlu i rezultati mjerenja na modelu ili na izvedenoj konstrukciji. U toj se analizi variraju ulazni podaci u prihvatljivom rasponu i nastoji preklopiti rezultate modeliranja s mjerenim vrijednostima. Ova se analiza naziva i povratna analiza. Rezultati povratne analize mogu se upotrijebiti kao ulazni parametri u proračunima za nove projekte.

Početak primjene numeričkoga modeliranja nosivih platformi od armiranog tla vezuje se uz kraj osamdesetih godina prošloga stoljeća [39], ali s ograničenim rezultatima, što je bilo uvjetovano tada dostupnim računalnim programima. Sredinom devedesetih godina razvoj naprednog softvera omogućuje modeliranje s boljim stupnjem točnosti. Iako se nosive platforme od armiranoga tla promatraju kao trodimenzionalni problem, modeliranje se provodi i kao dvodimenzionalno, pri čemu se modeli promatraju kao osno simetrični, s deformacijama u ravnini, ali se rezultati moraju uzeti s oprezom. Najčešće primjenivani računalni programi za numeričko modeliranje su na primjer Plaxis, Flac, PFC2D, PFC3D, ABAQUS, GEO-Slope. Numeričkim modeliranjem simuliraju se konstrukcijska svojstva nosivih platformi od armiranog tla, a najčešće primjenjivane numeričke metode su metoda konačnih elemenata i metoda diskretnih elemenata. Numeričkom simulacijom otkrivaju se složena inherentna svojstva svodnog djelovanja. Metoda konačnih elemenata temelji se na pretpostavci kontinuuma što je čini komplici-

ranom za razumijevanje mikro ponašanja, odnosno ponašanja pojedinih čestica ispune nasipa, dok se metoda diskretnih elemenata temelji na pretpostavci diskontinuumata te nudi pristup za stjecanje uvida u mikro ponašanje zrnatog materijala ispune nasipa [24, 38–41]. Osnovna teza budućega doktorskog rada je da će se metodom diskretnih elemenata moći bolje opisati interakcija zrna tla i geomreže, učinci svodnoga djelovanja i uloga geomreže u platformama.

### 3.1 Metoda diskretnih elemenata

U numeričkim modelima metode diskretnih elemenata variraju se razni parametri za simulaciju modela. Najčešće primjenjivani parametri mogu se podijeliti u dvije kategorije: karakteristike materijala i karakteristike interakcije koje čestice pokazuju u kontaktu s granicama, površinama i s drugim česticama. Numerički algoritam u općem slučaju započinje zadavanjem početnih uvjeta. Da bi se izračunala kontaktna sila u proračunu se traže kontaktna mjesta čestica kako bi se odredio kontakt preklapanja između svake pojedinačne čestice. Određivanje kontakta je vremenski najzahtjevniji zadatak, kao i računski najdulja operacija. Računanje se vrši u diskretnim vremenskim koracima. Između svakog vremenskog koraka čestice se kreću po pravcu na temelju izračunanih vrijednosti brzine i ubrzanja u tom vremenskom koraku. Ove trajektorije se upotrebljavaju za izračunavanje pozicija (prostornih koordinata) čestica u sljedećem vremenskom koraku. Preklapanja čestica, odnosno kontakti upotrebljavaju se za izračunavanje sila koje djeluju na svaku česticu, čime se određuju brzine i ubrzanja za svaku česticu u sljedećem diskretnom vremenskom koraku. Sila i moment koji djeluju na česticu predstavljaju zbroj svih sila i momenata koji djeluju na česticu.

Iako je većina numeričkih studija modeliranja nosivih platformi od armiranoga tla provedena metodom konačnih elemenata, neke su studije provedene metodom diskretnih elemenata [24, 42–43]. Ova se metoda više koncentrira na ispunu nasipa, odnosno na pomake čestica u ispuni nasipa, normalna i posmična naprezanja te orijentaciju kontakta čestica.

Autori Jenck, Dias i Kastner 2005. godine objavili su rad o mehanizmu prijenosa opterećenja koji se odvija u granuliranom materijalu nasipa na dvodimenzionalnom fizičkom laboratorijskom modelu nosive platforme nepodržane ojačanjem geosinteticima [37]. Kako sličnost između modela i prototipa nosive platforme nije striktno poštivana, autori smatraju da se rezultati ne mogu izravno primijeniti na stvarne strukture, ali mogu biti baza numeričkim ispitivanjima i modeliranjima. U skladu s time, autori Lai i ostali su u radu [24] objavili rezultate numeričkoga modeliranja poznatog i testiranog laboratorijskog uzorka [37], ali su modeliranje proširili i na slučaj ojačanja modela geosintetikom. Modeliranje je provedeno računalnim programom PFC2D [44], a numeričke simulacije IMCM (Improved Multi-layer Compaction Method) [45]. Provjera dobivenih podataka provodila se uspoređivanjem s eksperimentalnim rezultatima laboratorijskoga testnog uzorka. Analizirana su makro (na primjer efikasnost) i mikro ponašanja (kontaktna sile) te je provedena parametarska studija kojom su identificirana dva ključna

čimbenika – razmak pilota i visina nasipa, dok su krutost temeljnog tla i granulometrijski sastav ispunje nasipa manje utjecajni čimbenici. Modelirani su slučajevi s različitim veličinom opterećenja:  $\leq 90$  kPa, 90-300 kPa te  $> 300$  kPa, visine nasipa 100-700 mm te razmaka između pilota od 320, 450 i 650 mm. Rezultati numeričkoga modeliranja pokazali su da se, kada je visina nasipa dovoljno visoka, a opterećenje manje od 90 kPa, efikasnost svodnog djelovanja razvija postupno. Kod opterećenja od 90-300 kPa, svodni učinak je potpuno u funkciji, dok se kod opterećenja većeg od 300 kPa efikasnost svodnog djelovanja postupno smanjuje, i u nasipu se ne može oblikovati novo stabilno svodno djelovanje nakon što je preopterećenje prešlo određenu vrijednost. Kod nosive platforme ojačane geomrežom učinak membranskoga djelovanja došao je do izražaja kod opterećenja od 400 i više kPa. U slučajevima opterećenja manjim od 400 kPa utjecaj geomreže nije bio toliko izražen, iako su autori upozorili da je ojačanje geomrežom utjecalo na poboljšanje učinkovitosti prijenosa opterećenja. Analiza kontaktne sile na razini mikro ponašanja pokazala je da je gubitak kontakta između čestica najznačajniji čimbenik otkazivanja svodnog djelovanja u nasipu. Isti autori su u radu [43] objavili rezultate ispitivanja utjecaja pomaka pilota na svodno djelovanje u nosivim platformama ojačanim i neojačanim geosinteticima. Numeričko modeliranje provedeno je na testiranom laboratorijskom modelu autora [1] računalnim programom PFC2D. Numerički rezultati pokazuju da je pomak pilota ključni čimbenik stvaranja i oblika svodnoga djelovanja u nasipu neovisno o tome je li u nasipu ispitanog modela izvedeno ojačanje geosinteticima ili nije. Oblik svodnoga djelovanja je polusfera, a povećavanjem pomaka pilota visina polusfere se povećava.

## 4 Zaključak

Svodno djelovanje jedan je od ključnih čimbenika mehanizma prijenosa opterećenja i javlja se kao rezultat posmičnih naprezanja nastalih zbog diferencijalnoga slijeganja ispunje nasipa. Unatoč višegodišnjim istraživanjima mehanizam prijenosa opterećenja svodnim djelovanjem u nosivim platformama od armiranoga tla još uvijek nije u potpunosti razjašnjen. Poznati su neki od čimbenika koji utječu na razvoj i oblik svodnoga djelovanja, ali ne i njihov interaktivni učinak. Zahvaljujući numeričkom modeliranju i sofisticiranim računalnim programima omogućena je simulacija fizikalnih procesa te dobivanje odgovora na nepoznanice u ponašanju svih parametarskih veličina. U doktorskom istraživačkom radu primijenit će se metoda diskretnih elemenata za proučavanje interakcije tla i geosintetika na raspodjelu naprezanja u konstrukciji, a time i na deformacije. Numeričkim modeliranjem testiranoga laboratorijskog modela analizirat će se utjecaj uklještenja i utjecaj oslonjenosti pilota (oslonjeni i lebdeći piloti) na razvoj svodnog djelovanja i mehanizam prijenosa opterećenja, a koji postojećim metodama proračuna nije dovoljno obuhvaćen. Očekuje se da će se ovom metodom moći simulirati i interakcija tlo-geomreža, u smislu poboljšanja svojstava tla prisustvom geomreže, što se do sada nije istraživalo, a predstavljaju očekivani učinak, pogotovu za plitke nasipe i za zonu oko pilota.

## Zahvala

Autori zahvaljuju prof.dr.sc. Mensuru Mulabdiću na korisnim savjetima i pomoći kod izrade ovog rada.

## Literatura

- [1] Chen, Y., Cao, W., Chen, R.P.: An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments. *GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES*, 26 (2008), pp. 164-174.
- [2] Lawson, C.R.: Role of modelling in the Development of Design Methods for Basal Reinforced Piled Embankments. EuroFuge 2012, Delft, The Netherlands, April 23-24, 2012, Delft University of Technology and Deltares
- [3] Wood, H.J.: The design and construction of pile-supported embankments for the A63 Selby bypass. Proceedings of the International Conference on Foundations, Innovations, Observations, Design and Practise, Thomas Telford Services Ltd, London, United Kingdom pp. 941-950, 2003.
- [4] Collin, J.G., Watson, C.H., Han, J.: Column-Supported Embankments Solves Time Constraint for New Road Construction. *Contemporary Issues in Foundation Engineering*, GSP 131, Virginia, 2005.
- [5] Reid, W.M., Buchanan, N.W.: Bridge approach support piling. *Piling & Ground Treatment*, Thomas Telford Services Ltd, London, United Kingdom, pp. 267-274, 1984.
- [6] Han, J., Gabr, M.A.: Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 128 (2002), pp. 44-53.
- [7] Duijnen, P.G., Eekelen, S.J.M., Van der Stoel, A.E.C.: Monitoring of a railway piled embankment. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 1461-1464, 2010.
- [8] Terzaghi, K.: *Theoretical soil mechanics*. Wiley, New York, 1943.
- [9] Giroud, J.P., Bonaparte, R., Beech, J.F., Gross, B.A.: Geosynthetics systems overlying voids. *GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES*, 9 (1990), pp. 11-50.
- [10] Zhan, C., Yin, J.H.: Elastic analysis of soil-geosynthetic interaction. *Geosynthetics International*, Vol 8, pp. 27-48, 2001.
- [11] Kempton, G., Naughton, P.: Piled embankments with basal reinforcement: development of design methods and state of the art. Proceedings of the XV Italian Conference on Geosynthetics, 2002.
- [12] Li, Y., Aubeny, C., Briaud, J.: Geosynthetic Reinforced Pile Supported Embankments. Draft submitted to FHWA. Texas A&M University, College Station, 2002.
- [13] McNulty, J.W.: An Experimental study of arching in sand. Technical Report NO. I-674, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, p. 170, 1965.

- [14] Lawson, C.R.: Role of Modelling in the Development of Design Methods for Basal Reinforced Piled Embankments. EuroFuge 2012, Delft, The Netherlands, April 23-24, 2012, Delft University of Technology and Deltares
- [15] Hewlett, W.J., Randolph, M.F.: Analysis of piled embankments. *GROUND ENGINEERING*, 21 (1988) 3, pp. 12-18.
- [16] He, C., Lou, X.M., Xiong, J.H.: Arching Effect in Piled Embankments, ASCE Conference Proceedings GSP, Advances in Earth Structures, pp. 270-277, 2006.
- [17] Kempfert, H.G., Stadel, M., Zaeske, D.: Design of geosynthetic-reinforced bearing layers over piles. *BAUTECHNIK*, 74 (1997) 12, pp. 818-825.
- [18] Low, B.K., Tang, S.K., Choa, V.: Arching in piled embankments. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING*, 120 (1994) 11, pp. 1917-1938.
- [19] Liyanapathirana, D.S., Poulos, H.G.: Numerical simulation of geosynthetic reinforced pile supported embankments over soft ground, 20th Australian Conference on the Mechanical of Structures and Materials, Queensland, 2008.
- [20] Chevalier, B., Combe, G., Villard, P.: DEM numerical analysis of load transfers in granular soli layer, *STUDIA GEOTECHNICA ET MECHANICA*, 30 (2008) 1-2, pp. 147-163.
- [21] Hosseinian, S., Cheraghi Seifabad, M.: Optimization the Distance Between Piles in Supporting Structure Using Soil Arching Effect, *JOURNAL CIVIL ENGINEERING AND URBANISM*, 3 (2013) 6, pp. 386-391.
- [22] Chen, Y.M., Cao, W.P., Chen, R.P.: An experimental investigation of soil arching within basal reinforced an unreinforced piled embankments. *GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES*, 26 (2008) 2, pp. 164-174.
- [23] Gabr, M., Han, J.: Geosynthetic reinforcement for soft foundations: US perspectives. *International Perspectives on Soil Reinforcement Applications*, ASCE GEOTECHNICAL, Special Publication, 141 (2005), pp. 73-92.
- [24] Lai, H.J., Zheng, J.J., Zhang, J., Zhang, R.J., Cui, L.: DEM analysis of soil-arching within geogrid-reinforced and unreinforced pile-supported embankments. *COMPUTERS AND GEOTECHNICS*, 61 (2014), pp. 13-23.
- [25] Lu, W.H., Miao, L.C.: A simplified 2-D evaluation method of the arching effect for geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments. *COMPUTERS AND GEOTECHNICS*, 65 (2015), pp. 97-103.
- [26] Guido, V.A., Knueppel, J.D., Sweeny, M.A.: Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slabs. 1987.
- [27] Hewlett, W.J., Randolph, M.F.: Analysis of piled embankments. *GROUND ENGINEERING*, 21 (1988) 3, pp. 12-18
- [28] Carlsson, B.: Armerad jord-beräkningsprinciper för-bankar pa palar. Linköping: Terrateam AB. 1987.
- [29] Russell, D., Pierpoint, N.D.: A numerical investigation of behaviour of piled embankments. *GROUND ENGINEERING*, 30 (1997) 11, pp. 39-44



- [30] Russell, D., Naughton, P.J., Kempton, G.T.: A new design procedure for piled embankments. Proceedings of the 56<sup>th</sup> Canadian geo.Con., Winnipeg, 99. pp. 858-865, 2003.
- [31] Collin, J.G.: Column supported embankment design considerations. Proceedings of the 52nd Annual Geotechnical Engineering Conference. University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, pp. 51-78, 2004.
- [32] Kempfert, H.G., Gobel, C., Alexiew, D., Heitz, C.: German recommendations for the reinforced embankments on pile-similar elements. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Geosynthetics, Munich, pp. 279-284, 2004.
- [33] Abusharar, S.W., Zheng, J.J., Chen, B.G., Yin, J.H.: A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics. GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES, 27 (1) (2009), pp. 39-52
- [34] British Standards Institution. BS 8006-1995 British standards code of practice for improved/reinforced soil
- [35] EBGEO 2010 Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO), vol 2. German Geotechnical Society, Auflage
- [36] CUR 226 (2010) Ontwerprichtlijn paalmatrassystemen (Design Guideline Piled Embankments)
- [37] Jenck, O., Dias, D., Kastner, R.: Soft ground improvement by vertical rigid piles. Two-dimensional physical modelling and comparison with current design methods. SOILS FOUND, 45 (2005) 6, pp. 15-31.
- [38] Wang, Z.J., Jacobs, F., Ziegler, M.: Experimental and DEM investigation of geogrid-soil interaction under pullout loads. GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES, 44 (2016) 3, pp. 230-246.
- [39] Wang, Z.J., Jacobs, F., Ziegler, M.: Visualization of load transfer behaviour between geogrid and sand using PFC2D. GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES, 42 (2014) 2, pp. 83-93.
- [40] Han, J., Bhandari, A., Wang, F.: DEM analysis of stresses and deformations of geogrid-reinforced embankments over piles. INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMECHANICS, 12 (2012), pp. 340-350.
- [41] Bhandari, A., Han, J.: Investigation of geotextile-soil interaction under cyclic vertical load using the distinct element method. GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES, 28 (2010) 1, pp. 33-43.
- [42] Jenck, O., Dias, D., Kastner, R.: Discrete element modelling of a granular platform supported by piles in soft soil - Validation on a small scale model test and comparison to a numerical analysis in a continuum. COMPUTERS AND GEOTECHNICS, 36 (2009), pp. 917-927.
- [43] Lai, H.J., Zheng, J.J., Zhang, R.J., Cui, M.J.: Visualization of the formation and features of soil arching within a piled embankment by DEM simulation. JOURNAL OF ZHEJIANG UNIVERSITY-SCIENCE A (APPLIED PHYSICS & ENGINEERING), (2016)
- [44] Itasca Consulting Group, Inc. PFC2D user's manual, version 4.0. Itasca Consulting, Group; 2008.
- [45] Jiang, M.J., Konrad, J.M., Leroueil, S.: An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies. COMPUTERS AND GEOTECHNICS, 30 (2003) 7, pp. 579-597.

# Inženjerskogeološko modeliranje diskontinuiteta u Dinarskom kršu s ciljem otkrivanja podzemnih krških pojava

Bojan Vivoda<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Mladen Garašić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Autocesta Rijeka-Zagreb d.d., *bvivoda@gmail.com*

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

## Sažetak

Projektiranje i izgradnja infrastrukturnih objekata u kršu suočava se s brojnim inženjerskim izazovima zbog pojava kaverni i ostalih krških struktura nepredvidivog položaja, dimenzija i geometrije. Cilj je ovog istraživanja izraditi metodologiju istraživanja i analize dostupnih podataka koja će omogućiti izradu inženjerskogeološkog modela diskontinuiteta i određivanje zona različite vjerojatnosti pojave kaverni i drugih endogenih (podzemnih) krških pojava, ovisno o njihovoj veličini, stupnju karstifikacije i drugim parametrima.

*Ključne riječi: okršavanje, kaverne, inženjerska geologija, geotehnika, geofizika*

## Engineering geological modelling of discontinuities in Dinaric karst aimed at discovering caverns and other underground karst phenomena

### Abstract

The design and construction of infrastructure facilities in karst is faced with a number of engineering challenges due to occurrence of caverns and other karst structures of unpredictable position, size, and geometry. The aim of this research is to develop a methodology for the research and analysis of available data that will enable creation of an engineering geological model of discontinuities, and determination of zones of different probability of occurrence of caverns and other endogenous (underground) karst phenomena, depending on their size, level of karstification, and other parameters.

*Key words: karstification, caverns, engineering geology, geotechnics, geophysics*

## 1 Uvod

Više od 50 % površine Hrvatske nalazi se u krškom terenu koji je karakteriziran otapanjem vapnenaca, dolomita i drugih topljivih stijena pod utjecajem vode, CO<sub>2</sub>, temperature itd. Kao posljedica ovog procesa, često nazivanog 'karstifikacija ili okršavanje', veliki broj krških pojava povezan je s inženjerskim aktivnostima te neposredno utječe na postojeću infrastrukturu, posebice na autoceste i ceste. Budući da se velik dio od 1300 km ukupno izgrađenih autocesta u Hrvatskoj nalazi na terenu pogodnom za okršavanje, kaverne i slične krške pojave imaju veliki utjecaj kako na same građevinske radove, tako i na ponašanje konstrukcije tijekom eksploatacije.

Razumijevanje prostorne distribucije kaverni i ostalih krških podzemnih pojava znatno je napredovalo tijekom posljednja dva desetljeća. Prema Loweu (1992) danas je moguće izračunati vjerojatnosti pojave pojedinih krških pojava unutar krškog masiva identifikacijom nekoliko početnih (temeljnih) slojeva stijenske mase [1]. Ova su istraživanja provedena u Ujedinjenom Kraljevstvu, Kreti, Kanadi i Tongi, a pitanje je da li se isti principi mogu primijeniti i na Dinarski krš.

## 2 Razvoj krških pojava

U Hrvatskoj se nalaze dva osnovna tipa naslaga različitih inženjerskogeoloških značajki. To su s jedne strane pretežito karbonatne čvrsto vezane stijene područja Dinarida i s druge nekoherentne ili u manjoj mjeri koherentne klastične naslage Panonskog područja. Krš je vapnenački krajolik karakteriziran podzemnom drenažom, špiljama, vrtačama, suhim dolinama, tankim pokrovom tla i ogoljenim izdancima stijena.

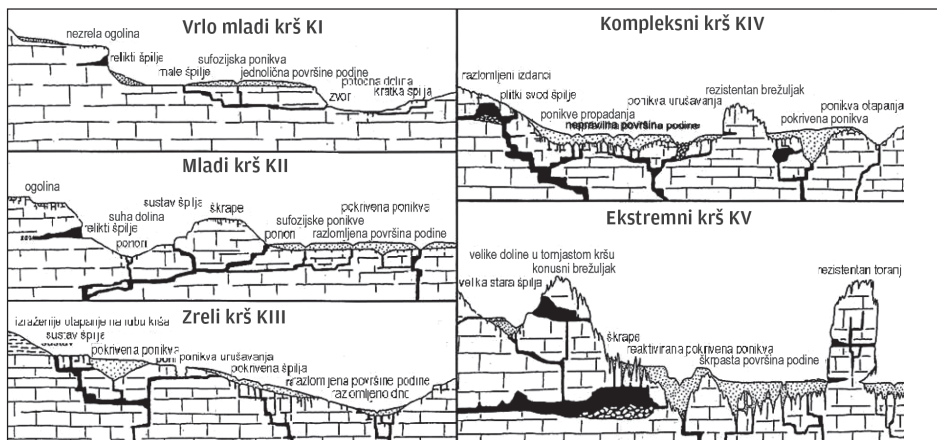
Naslage Jadranske karbonatne platforme nalaze se danas najvećim dijelom u Hrvatskoj (slika 1.). Te naslage čine veliki dio cijelog karbonatnog slijeda hrvatskog dijela krša Dinarida, koji mjestimice nadilazi debljinu od 8000 m [2] sa stratigrafskim rasponom od srednjeg perma do eocena [3]. Okršavanje je proces kontinuiranog kemijsko-mehaničkog trošenja vapnenca kroz dulje razdoblje koje rezultira kavernošnom stijenskom masom isprepletenom diskontinuitetima. Površina takve stijenske mase je prekrivena manjim i većim depresijama.

U osnovi, razlikuju se tri faze okršavanja i ovisno o njima razlikuju se svojstva krša: mladi krš, zreli krš i stari krš. Krajolik u mladom kršu nije previše potonuo i zadržava normalnu površinsku drenažu. Kod zrelog krša stvaraju se vertikalne pukotine i plitke špilje. Špilje se nakon nekog vremena urušavaju pri čemu dolazi do stvaranja vrtača na površini. Zbog toga je površina terena neravna, a krovinske naslage zauzima crvenica koja lako propušta dospjelu vodu. U starom kršu vapnenac je skoro potpuno uklonjen, a na njegovu mjestu se nalazi talog zemlje sastavljen od netopljivih čestica zaostalih nakon otapanja minerala kalcita i dolomita. Vrijeme potrebno da čvrsti, kompaktni vapnenac prođe kroz sve tri faze je dugo, dok će porozni, mekani vapnenac brže proći kroz ove faze, pa će se raspadanje lakše uočiti.



Slika 1. Karta rasprostiranja Jadranske karbonatne platforme (modificirano prema Vlahović et al., 2005)

Zanimljiva inženjerska klasifikacija karbonatnih stijena temelji se na zapažanju pojava posebnih morfoloških značajki i pojava fenomena krša [4], slika 2. Klasifikaciju su zapravo definirali Fookes i Hawkins izdvajanjem različitih tipova krških pojava. Svojeviti profili stanja, odnosno trošenja krša podijeljeni su u pet skupina [5]. Klasifikacija ima regionalnu primjenu kao procjena razine trošenja karbonatnih stijena.



Slika 2. Morfološki fenomeni krša i njihove značajke (Waltham i Fookes, 2003). Okvirna i regionalna klasifikacija karbonatnih stijena u pet skupina prema profilima trošenja

### **3 Istražni radovi u stijenskoj masi dinarskoga krša**

Otkrivanje diskontinuiteta, tj. raspucanih zona i kaverni najčešće je vezano uz veće građevinske zahvate na krškim terenima, eksploataciju kamena i podzemne vode. Posebno pozornost zahtijevaju zbog činjenice da nisu uočljive s površine, a nailaskom na njih geotehnička konstrukcija zahtijeva znatne projektne i izvedbene promjene. Standardne metode istraživanja koje obuhvaćaju analizu prethodnih istraživanja, geološka prospekcija, geološko kartiranje, geofizičke metode, istražne bušotine, hidrogeološke, petrografske, strukturno geološke, geomehaničke i ostale analize imaju svoje prednosti i nedostatke, te nam daju niz podataka koje je potrebno objediniti uz nužne prilagodbe svakom projektu i široj lokaciji, financijskom proračunu i prihvatljivom riziku.

#### **3.1 Geološko kartiranje**

Geološkim kartiranjem kao jednom od metoda prospekcije, a na temelju vizualnoga pregleda i uzimanja uzoraka, prikupljanaju se informacije na terenu na temelju kojih se opisuje geološka građa terena, a osobito se rabe u svrhu utvrđivanja strukturnogeoloških, hidrogeoloških i inženjerskogeoloških osobitosti terena.

#### **3.2 Istražne bušotine**

Metoda istražnog bušenja rabi se tradicionalno kao jedna od osnovnih metoda za inženjerskogeološke interpretacije podzemlja. Iako se istražnim bušenjima dobivaju kvalitetne informacije na samoj lokaciji bušenja, a osobito vezano za određivanje geotehničkih parametara, ove točkaste informacije dobivene su u diskretnom području te je kao takvo istražno bušenje neučinkovit alat za detekciju prostornog smještaja i dimenzija krških pojava i podzemnih anomalija.

#### **3.3 Geofizička istraživanja**

Da bi se prevladali problemi koji proizlaze iz primjene razornih metoda istraživanja kao što je bušenje, u posljednjih nekoliko desetljeća u građevinarstvu se široko primjenjuju nerazorne geofizičke metode. Iako je glavna prednost ovih metoda znatna ušteda vremena i financijskih sredstava, još uvijek postoji nedostatak informacija kojima bi se odabrao set prikladnih metoda i parametara za mjerenje pri uporabi geofizičkih metoda za istraživanje krških pojava. Drugi je nedostatak geofizičkih metoda to da one ne mogu izravno (bez korelacije) pružiti informacije o fizikalno-mehaničkim svojstvima stijena, iako to nije od presudnog značaja kada se radi o jednostavnom kartiranju podzemlja. Općenito, nerazorne geofizičke metode mogu se podijeliti na geoelektrične, seizmičke i elektromagnetske metode. Svaka skupina sadrži veliki broj metoda i neke su od njih rabljene za otkrivanje krških pojava duž hrvatskih autocesta. Ove metode uključuju metode seizmičke refrakcije, višekanalne analize površinskih valova i elektromagnetske metode georadara (GPR). U dosadašnjim istraživanjima metodom seizmičke

refrakcije dobiveni su najbolji rezultati kada je u pitanju kartiranje tj. prospekcija krških pojava [6].

Geofizička istraživanja na krškim terenima su izuzetno zahtjevna zbog složenih geoloških odnosa. Poteškoću geofizičkim istraživanjima nameću površinske krške pojave. Primjerice, ponikve i škrape ispunjene zemljom crvenicom imaju vrlo male otpornosti i seizmičke brzine dok su kod svježih i kompaktnih stijena otpornosti i seizmičke brzine vrlo velike. Takve izmjene trošne i kompaktne stijenske mase u površinskoj, okršenoj zoni su česte, a izazivaju znatne smetnje pri mjerenju geofizičkih signala. Geofizička istraživanja krša zbog toga zahtijevaju primjenu barem dvije komplementarne metode i izuzetno pažljivo pozicioniranje mjernih točaka i profila na terenu. Voda u krškim terenima najčešće ispunjava rasjedne i pukotinske zone, a često se pojavljuje i u disolucijskim diskontinuitetima. Definiranje zona diskontinuiteta sekundarne poroznosti, u kojima se može nalaziti voda, često je najvažnija zadaća geofizičkih istraživanja [7].

#### 4 Primjena modela u inženjerskoj geologiji

Inženjerskogeološki model je prikaz inženjerskogeoloških značajki u različitim mjerilima, izrađen s ciljem rješavanja zadanog inženjerskog problema. Kao takav, model je hipoteza koja se testira, ponajprije kroz istražne radove, te predstavlja aproksimaciju stvarnosti stvorenu radi rješavanja inženjerskih problema. Konceptcija inženjerskogeološkog modela ovisit će prvenstveno o geologiji istraživane lokacije te građevinskom zahvatu koji se namjerava izgraditi na zadanom području, bilo da se radi o sanaciji nestabilnosti, temeljenju ili nekom drugom zahvatu, a tako dobiveni inženjerskogeološki model može poslužiti kao jedan od ulaznih parametara za izradu geotehničkog projekta. Stoga bi inženjerskogeološki model trebao osigurati dovoljno informacija za razumijevanje podloge tj. stijenske mase na temelju dostupnih podataka za geotehničko projektiranje s prihvatljivom razinom pouzdanosti.

Imajući u vidu da geotehnička složenost proizlazi iz tri procesa: iz genetskih procesa povezanih s izvornim formiranjem stijenske mase, epigenetskih procesa uslijed dijagenese i deformacija i procesa trošenja [8], koji definiraju inženjerskogeološke značajke određenog područja. Pollak predlaže izradu inženjerskogeološki modela dinarskog krša kao sintezu tri osnovna modela, i to: sedimentološkog, strukturno geološkog i modela trošenja stijena [9]. Također, inženjerskogeološki model trebao bi definirati stupanj nesigurnosti i nepoznanice, tako da se mogu uključiti u analize pri geotehničkom projektiranju ili tako da se procjenom nepredviđenih troškova projekta mogu pokriti ovako detektirani rizici.

U inženjerskoj geologiji primjenjuju se tri vrste modela, ovisno o dostupnim informacijama na temelju kojih su izrađeni:

- Konceptualni ili prognozni inženjerskogeološki model. To je obično prvi model u projektu izveden iz postojećih tj. dostupnih podataka. Ovaj model potencijalno uključuje relativno visok stupanj nesigurnosti koji se izravno odnosi na vrstu i količinu postojećih podataka i znanja i iskustva uključenih.
- Opažački inženjerskogeološki model, izrađen na bazi podataka dobivenih opažanjima i mjerenjima u istražnim radovima specifičnim za samu lokaciju istraživanja.
- Analitički model koji se rabi za prikaz mogućega ponašanja stijenske mase tijekom procesa gradnje, uvjetovano projektiranim geotehničkim rješenjem. Analitički modeli značajno ovise o prirodi same stijenske mase i primijenjenoga geotehničkog rješenja [9].

## 5 Primjeri krških pojava duž trase autoceste Rijeka-Zagreb

Tijekom zadnjih nekoliko godina problemi okršavanja postaju sve očitiji, a potvrda je tomu sve veći broj uočenih pojava. Neke od tih pojava na autocesti Rijeka-Zagreb prezentirane su u ovom radu, uključujući kavernu u tunelu Vrata, kavernu kod čvora Bosiljeva, sufozijsko propadanje u blizini tunela Sv. Marko i propadanje kolnika u blizini tunela Veliki Gložac zbog karstifikacije donjih slojeva.

**Primjer 1:** Kaverna u tunelu Vrata, na autocesti Rijeka-Zagreb. Pri izgradnji autoceste Zagreb-Rijeka otkrivene su brojne kaverne od vrlo malih do najvećih dimenzija, kao što je kaverna u tunelu Vrata, koja je u svijetu jedna od najvećih premoštenih tj. kroz koju prolazi trasa autoceste. Tlocrtne dimenzije ove kaverne su 83x63 m, a visina je 45 m [11].

**Primjer 2:** Kaverna na devetom kilometru autoceste Rijeka-Zagreb, kod čvora Bosiljevo. U veljači 2014. pojavio se otvor dubine od oko 3 m i površine 10 m<sup>2</sup>, između dva vozna traka autoceste. Geološkim kartiranjem i ostalim istražnim radovima pokazalo se da je razlog za to tzv. "obrnuto" okršavanje u kojem se stijenska masa otapa od nižih prema slojevima bližima površini. Nakon što je proces okršavanja zahvatio veći dio stijene gotovo do površine, kolaps materijala s površine u kavernu, koja se nalazi na većoj dubini, bio je neizbježan [12].

**Primjer 3:** Sufozijsko propadanje uz autocestu Rijeka-Zagreb, u blizini tunela Sv. Marko. U kišnom razdoblju zime 2014./15. godine, otvor površine 13 m<sup>2</sup>, nepoznate geneze i morfologije pojavio u blizini električne trafostanice u km 46+300 uz autocestu Rijeka-Zagreb, neposredno pored ulaza u tunel Sv. Marko [13].

**Primjer 4:** Propadanje kolnika autoceste Rijeka-Zagreb, u blizini tunela Veliki Gložac zbog karstifikacije donjih slojeva. U blizini izlaza iz tunela Veliki Gložac, u km 9+500 autoceste Rijeka-Zagreb, primijećeno je ulegnuće na kolniku u duljini od 6 m s denivelacijom od 20 cm od prvotne površine kolnika, pokrivajući dva vozna traka autoceste. Nakon provođenja geoloških i geofizičkih istražnih radova zaključeno je da je razlog ulegnuća speleološki objekt koji je djelomično otkriven tijekom izgradnje autoceste 1997. i 2001. godine. Procjena je da je jedan dio tada otkrivenoga i saniranog speleološkog objekta, koji je u fosilnoj fazi speleogeneze, ostao pod kolnikom autoceste te je daljnja progresija okršavanja uzrokovala zamijećeno ulegnuće na kolniku [14].

## 6 Zaključak

Veliki dio hrvatskih autocesta nalazi se u krškom terenu, osjetljivom na procese okršavanja stijenske mase i pogodnom za razvoj brojnih krških pojava koje prilikom gradnje i održavanja infrastrukturnih objekata stvaraju znatne probleme. Osobito su značajne pojave kaverni i sličnih krških pojava koje istražnim radovima i standardnim metodama istraživanja nisu otkrivene ili je progresijom došlo do razvoja novih, odnosno povećanja postojećih diskontinuiteta stijenske mase koji mogu ugroziti stabilnost postojećih građevina.

Zbog specifičnih fizikalnih značajki krša primjena kombiniranih istraživačkih metoda može dati dobre rezultate, posebice ako se uvažavaju svi relevantni utjecaji reljefa i geološke značajke te ako se terenskim mjerenjima pristupi s pomno razrađenim geološkim konceptijskim tj. prognosnim modelom. Pravilno osmišljenim inženjerskogeološkim modelom, izrađenim na osnovi inženjerskogeološkog kartiranja i interpretacije odgovarajućih istražnih radova (bušotine, geofizika, in situ ispitivanja) projektantu se daje na znanje u kakvim "geološkim uvjetima" projektira građevinu i na taj način se smanjuje vjerojatnost hazarda tijekom i nakon izvedbe građevine.

Cilj ovog istraživanja je međusobna usporedba rezultata različitih geofizičkih metoda istražnih radova u kršu, kao njihova i usporedba sa podacima dobivenim drugim metodama istraživanja te eventualni razvoj sustava optimalnog odabira odgovarajućih istražnih radova za izradu inženjerskogeološkog modela diskontinuiteta kojim bi se definirala vjerojatnost pojave kaverni i sličnih pojava u kršu.

## Literatura

- [1] Lowe, D. J., Gunn, J.: Carbonate speleogenesis: An Inception Horizon Hypothesis, *Acta Carsologica*, 26/2, 38, pp. 457-488., 1997
- [2] Tišljar, J., Vlahović, I., Velić, I., Sokač, B.: Carbonate Platform Megafacies of the Jurassic and Cretaceous Deposits of the Karst Dinarides. *Geologia Croatica*, 55 (2002) 2, pp. 139-170, Preuzeto s <http://hrcak.srce.hr/3801>



- [3] Velić, I., Tišljar, J., Vlahović, I., Velić, J., Koch, G., Matičec, D.: Palaeogeographic Variability and Depositional Environments of the Upper Jurassic Carbonate Rocks of Velika Kapela Mt. (Gorski Kotar Area, Adriatic Carbonate Platform, Croatia). *Geologia Croatica*, 55 (2002) 2, pp. 121-138, Preuzeto s <http://hrcak.srce.hr/3800>
- [4] Waltham, A.C., Fookes, P.G.: Engineering classification of karst ground conditions *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, pp. 101-118, 2003
- [5] Fookes, P.G., Hawkins, A.B.: Limestone weathering: its engineering significance and a proposed classification scheme, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 21, pp. 7-31, 1988
- [6] Bačić, M., Vivoda, B., Kovačević, M.S.: Remediation of karst phenomena along the Croatian highways, 4<sup>th</sup> International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2016, Šibenik, Hrvatska, 23-25 May 2016.
- [7] Kearey, P., Brooks, M., Hill, I.: *Uvod u geofizička istraživanja*, Blackwell Science Ltd., Oxford, Engleska, 2002.
- [8] Morgenstern, N.R., Cruden, D.M.: Description and Classification of Geotechnical Complexities, *Proc. International Symposium on Geotechnics of Structurally Complex Formations*, Capri, Italija, 1977.
- [9] Pollak, D., Navratil, D., Novosel, T.: Specific aspects of engineering-geological models in Croatian karst, *Geologia Croatica*, 66/3, pp. 219-232, Zagreb, 2013
- [10] Parry, S., Baynes, F.J., Culshaw, M.G. et al., *Engineering geological models: an introduction: IAEG commission 25*, *Bull Eng Geol Environ* 73, 68, 2014.
- [11] Garašić, M., Kovačević, M.S., Jurić-Kačunić, D.: Istraživanje i sanacija kaverne u tunelu Vrata na autocesti Zagreb - Rijeka, *ACTA CARSOLOGICA*, 39, pp. 61 - 77, 2010.
- [12] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu: Sanacija kaverne na dionici Vrbovsko-Bosiljevo, u 9 km od čvora Bosiljevo II (na hrvatskom), izvedbeni projekt IZP-110-020 / 2014, svibanj 2014.
- [13] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu: Propadanje tla na pokosu, dionici Karlovac - Bosiljevo u km 46+300 autoceste Rijeka - Zagreb, u smjeru Rijeke, izvedbeni projekt IZP-110-031 / 2015, svibanj 2015.
- [14] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu: Sanacija ulegnuća kolnika Iza izlaznog portala tunela Veliki Gložac, km 9+500, južni kolnik, smjer Zagreb, Autocesta A6, izvedbeni projekt IZP-110-006 / 2016, siječanj 2016.

# Seizmičko i geološko mikrozoniranje zapadnoga dijela podsljemenske urbanizirane zone prema standardima Eurokoda 8

Ivan Kosović<sup>1</sup>, izv.prof.dr.sc. Stjepan Strelec<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hrvatski geološki institut, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju, [ivan.kosovic@hgi-cgs.hr](mailto:ivan.kosovic@hgi-cgs.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za geotehniku, [stjepan.strelec@gfv.hr](mailto:stjepan.strelec@gfv.hr)

## Sažetak

Kako bi se građevine mogle projektirati i izgraditi tako da na njih ne utječu seizmičke aktivnosti, potrebno je istražiti seizmološke karakteristike prostora na kojem se namjerava graditi, izvršiti kategorizaciju tla i preporučiti projektne vrijednosti maksimalnoga potresa za istražnu lokaciju kako propisuje Eurokod 8. Prilikom širenja seizmičkih valova kroz tlo dolazi do amplifikacije (engl. amplification) seizmičke pobude od osnovne stijene (engl. *bedrock*) do površine tla (engl. *surface ground*). Metoda mjerenja mikrosezmičkog nemira, tzv. HVSR metoda, u posljednja dva desetljeća pokazala se kao brza i jednostavna metoda za istraživanje odziva tla, tj. za određivanje rezonantne frekvencije tla i faktora amplifikacije. U ovom radu prikazan je princip metode mjerenja mikrosezmičkog nemira u procjeni odziva tla na području zapadnog djela urbanizirane podsljemenske zone. Uočena je veoma jaka povezanost između geološke strukture i izmjerenih frekvencija i amplifikacija tla.

*Ključne riječi: inženjerska geologija, MASW, mikrosezmički nemir, Eurokod 8, HVSR*

## Seismic and geological microtremor measurements according to Eurocode 8 standards for western part of Sljeme foothills urbanized zone

### Abstract

In order to design and construct buildings that would not be affected by seismic activities, it is necessary to investigate seismic properties of the area, categorise the soil, and recommend maximum design earthquake values for the area under study, as required by Eurocode 8. Over the past two decades, the microtremor measurement method, e.g. HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), has proven to be a fast and simple method for the assessment of local site effects, i.e. for the determination of resonant soil frequencies and soil amplification factors. The use of microtremor measurement method for assessing local site effects in the western part of the Sljeme foothills urbanized zone is presented in the paper. A strong correlation has been established between the geological structure, measured frequencies and amplification of soil.

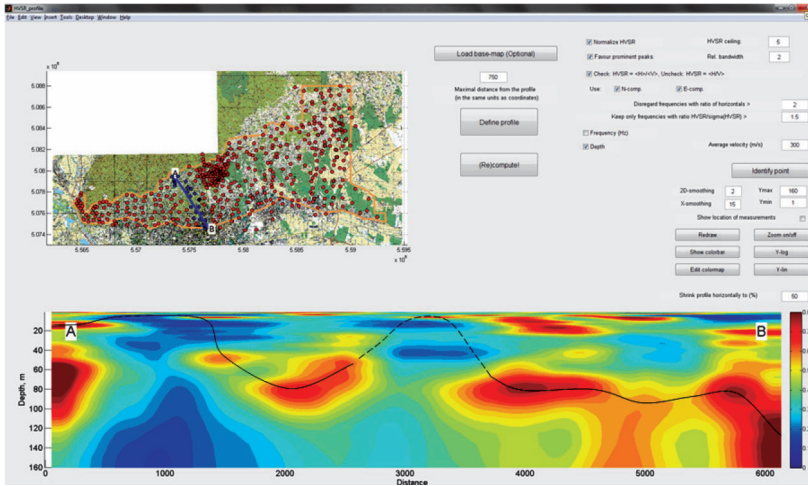
*Key words: engineering geology, MASW, microtremor, Eurocode 8, HVSR*

## 1 Uvod

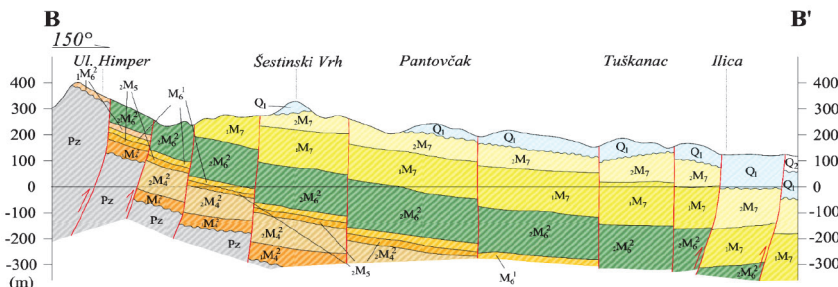
Za provođenje mikrozoniranja na području podsljemenske zone bilo je nužno mjerenje mikroseizmičkog nemira kombinirati s drugim vrstama mjerenja i analiza – ponajprije s primijenjenim geofizičkim istraživanjima poput plitkih seizmičkih refrakcijskih i refleksijskih profiliranja, analize površinskih valova (ReMi, MASW) i sl., te s rezultatima detaljnoga inženjerskogeološkog mikrozoniranja [1]. Zbog toga je predloženo da se u odabranoj pilot-zoni unutar podsljemenske urbanizirane zone provedu i sva ostala potrebna dopunska istraživanja, te da se na temelju toga iskustva definira najučinkovitija metodologija seizmičkog mikrozoniranja koju će se primijeniti i u preostalom dijelu gradskog prostora. Kao pilot-područje odabran je zapadni dio podsljemenske zone površine 31,5 km<sup>2</sup>, jer dosadašnja istraživanja na području podsljemenske urbanizirane zone pokazuju da je to prostor na kojem se na maloj površini mogu očekivati relativno brze izmjene tipova tla [2]. Cilj pilot projekta je bio mjerenjem mikroseizmičkog nemira dobiti osnovne informacije o građi površinskih slojeva tla na području zagrebačke podsljemenske urbanizirane zone te tako doprinijeti spoznaji o njihovu odzivu na seizmičku pobudu. Takva mjerenja daju važne informacije o amplifikacijskom spektru i rezonantnim periodima osciliranja tla na pojedinoj lokaciji. Za prevenciju i zaštitu od potresa posljednjih je nekoliko desetljeća definiranje seizmičkoga hazarda i seizmičkog rizika postalo standardno u prostornim i urbanističkim planovima. Kombinacijom seizmičko–geotehničko–geološkog istraživanja mogu se definirati parametri potrebni za protupo-tresnu gradnju, kao i za definiranje potencijalnih rizika oštećenja od potresa [3].

## 2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Tijekom prve faze pripreme za mikrozoniranje Grada Zagreba [4] obavljeno je mjerenje mikroseizmičkog nemira na cijelom prostoru podsljemenske zone. Tom su prilikom mjerenja izvršena na osnovnoj i gustoj mreži mjernih točaka na ukupno 491 lokaciji, uz prosječnu gustoću mjerenja od 3 točke/km<sup>2</sup>. Izmjereni HVSR spektri poslužili su za izradu HVSR spektrogramskih profila (slika 1.) koji svi ukazuju na produbljenje razine osnovne stijene u generalnom smjeru od sjeverozapada prema jugoistok. Usporedba s dostupnim geološkim podacima iz projekta *Detaljna inženjerskogeološka karta podsljemenske urbane zone* (DIGK – faza I) pokazala je da prvi maksimumi u HVSR spektrima najvjerojatnije odgovaraju rezonanciji unutar najmlađih naslaga iz pleistocena i holocena [2].



Slika 1. Spektrogramski profil opaženih HVSR spektara koji se proteže od ulice Himper u Šestinama do Ilice



Slika 2. Približno isti profil (slika 1.) preuzet s detaljne geološke karte izrađene u Hrvatskom geološkom institutu za potrebe Projekta kompleksnih geotehničkih i seizmičkih istraživanja za potrebe planiranja i građenja na području Grada Zagreba [5]

Na kartama izraženosti rezonantnih šiljaka u HVSR spektrima identificirana su područja na kojima, za niz pretpostavljenih rezonantnih frekvencija između 1 i 15 Hz, može doći do rezonancije zgrade i tla, ako se vlastita frekvencija zgrade i tla nalaze vrlo blizu jedna drugoj. Takve informacije mogu biti od velike važnosti pri donošenju prostornih planova te određivanju što se, gdje i kako smije graditi. Poznavanje frekvencija kojima tlo preferentno oscilira omogućuje i identifikaciju postojećih građevina koje su ugrožene rezonancijom zgrada - tlo tijekom potresa, ako se raspolaže informacijom o dinamičkim parametrima (vlastitim periodima i pripadnim prigušenjima) za svaku zgradu. Na posljednju, izrađena je i preliminarna karta linearnog dinamičkog faktora amplifikacije (DAF) na temelju aproksimacije  $HVSR = AMP_s$ , koja pokazuje izvanrednu kvalitativnu podudarnost s detaljnom geološkom kartom podsljemenske zone.

### 3 Metode upotrijebljene za izradu karte seizmičkog mikrozoniranja

#### 3.1 Inženjerskogeološko kartiranje

Procjena lokalnih uvjeta tla važna je da bi se odredile karakteristike gibanja površinskih valova [3]. U skladu s tim načinjena je sinteza postojećih dostupnih rezultata istraživanja inženjerskogeoloških i geotehničkih svojstava tla na istraživanom području. To se prvenstveno odnosi na projekt DIGK – faza I [2].

Pri izradi inženjerskogeološke karte ocjenjivana je krutost tla geofizičkim metodama koje se temelje na spektralnoj analizi površinskih valova (MASW). Osim toga upotrijebljena su postojeća seizmička istraživanja (refrakcijske seizmike i downhole metode rađene za objekte koji su unutar istraživanog terena). Na dijelovima karte gdje nije bio dovoljan broj seizmičkih istraživanja upotrijebljena su ispitivanja standardnim penetracijskim pokusima (SPP) iz prve faze istraživanja (DIGK) [2], isto tako uzeto je 30 uzoraka ciljano za ovaj projekt i načinjena su laboratorijska ispitivanja čvrstoće tla ili stijene, granulometrijska ispitivanja, određivane su atterbergove granice tečenja i plastičnosti [5]. Rezultat je nova inženjerskogeološka karta načinjena prema Eurokodu 8 [6]. Glavne mehaničke karakteristike površinskih naslaga prema Eurokodu 8 određene su prema odnosu na seizmičku osjetljivost: A, B, C, D, E, S1 i S2 (tablica 1.). Prema ovoj podjeli tipovi tla opisani su stratigrafskim profilom kroz tri parametra: srednjom brzinom posmičnih valova do 30 metara dubine ( $v_{s,30}$ ), srednjim SPP-om (standardnim penetracijskim pokusom) i srednjom nedreniranom posmičnom čvrstoćom ( $c_u$ ).

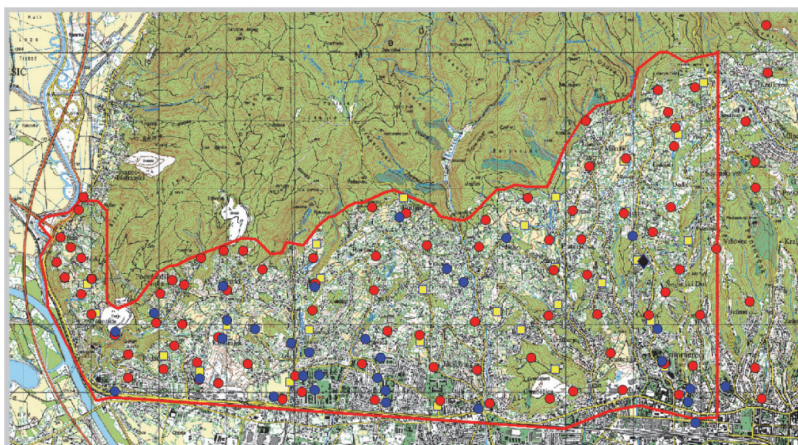
Tablica 1. Klasifikacija tla po Eurokodu 8 [6]

Tip tla	Opis stratigrafskog profila	$v_{s,30}$ [m/s]	N [udarci/30 cm]	$c_u$ [kPa]
A	Stijena ili njoj slične geološke formacije, uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini	> 800	-	-
B	Slojevi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo čvrste gline, debljine najmanje nekoliko desetina metara, karakterizirani stupnjevitim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom	360–800	> 50	> 250
C	Slojevi zbijenog ili srednje zbijenog pijeska, šljunka ili čvrste gline, debljine od nekoliko desetina do više stotina metara	180–360	15+50	70–250
D	Rastresiti do srednje zbijeni nevezani sedimenti (s ili bez mekanih kohezivnih slojeva) ili predominantno mekano do čvrsto kohezivno tlo	< 180	< 15	< 70
E	Tlo se na površini sastoji od aluvijalnih nanosa sa vrijednosti $v_{s,30}$ prema tipu C ili D i debljinom između 5 i 20 m, ispod kojeg je krući materijal sa $v_{s,30} > 800$ m/s			
S <sub>1</sub>	Tlo sadrži najmanje 10 m deo sloj mekane gline s visokim plastičnim indeksom (PI > 40) i viskom sadržajem vode	< 100 (približno)	-	10–20
S <sub>2</sub>	Tlo podložno likvefakciji s osjetljivim glinama ili bilo koji drugi profil tla koji nije uključen u kategorije A-E ili S <sub>1</sub>			

### 3.2 Geofizičke metode – MASW

Mjerenja iz prve faze projekta mikrozoniranja grada Zagreba [4] u pilot-projektu nadopunjena su jednim refleksijskim profilom, 33 refrakcijska profila, 33 mjerenja disperzije površinskih valova MASW postupkom, 33 mjerenja disperzije površinskih valova ReMi postupkom i s dodatnih 35 mjerenja mikrosezmičkog nemira.

Mjerenja su provedena na 33 mjerne točke (SMJ-1 do SMJ-33, na slici 3. označene žutom oznakom), na kojima su izvedena mjerenja metodama seizmičke refrakcije, MASW i ReMi. Na jednoj od lokacija, SMJ-5, izvedeno je i mjerenje plitkom seizmičkom refleksijom. Prostorna distribucija mjernih točaka čini donekle pravilnu mrežu kojom je prekriveno istraživano područje s gustoćom od približno 1 točke/km<sup>2</sup>. Smjer svih seizmičkih profila bio je približno N–S, tj. okomit na geološke strukture. Mjerenja su izvedena 24-kanalnim terenskim seizmografom s 24-bitnim digitalizatorom. Geofoni su imali vlastitu frekvenciju od 4,5 do 30 Hz, ovisno o vrsti mjerenja. Tijekom istraživanja, za procjenu dinamičkih svojstava tla ( $v_{s30}$ ), ponajprije je primjenjivana MASW metoda. MASW (eng. *Multichannel Analysis of Surface Waves*) je seizmička geofizička metoda koja se temelji na analizi površinskih valova i činjenici da su oni disperzivni, tj. da im se brzina mijenja s promjenom frekvencije. MASW-metodom se kao rezultat mjerenja i obrade dobiva presjek razdiobe brzina transverzalnih valova po dubini [7]. Razlog velikoj primjeni metode leži u jednostavnosti mjerenja na terenu, relativno brzom i jednostavnoj obradi te konačnom rezultatu, modelu brzina S-valova, potrebnom za geotehničko projektiranje.



Slika 3. Položaji mjernih točaka u pilot-području na zapadu podsljemenske zone u Zagrebu. Crveno - mikrosezmički nemir, prva faza projekta [4]; plavo - mikrosezmički nemir, dodatna mjerenja u ovom projektu; žuto - geofizička mjerenja

ReMi (*Refraction Microtremors*) metoda je seizmička metoda za in-situ određivanje dubinskih presjeka transverzalnih, S-valova. Kao izvor seizmičkih valova rabi se am-

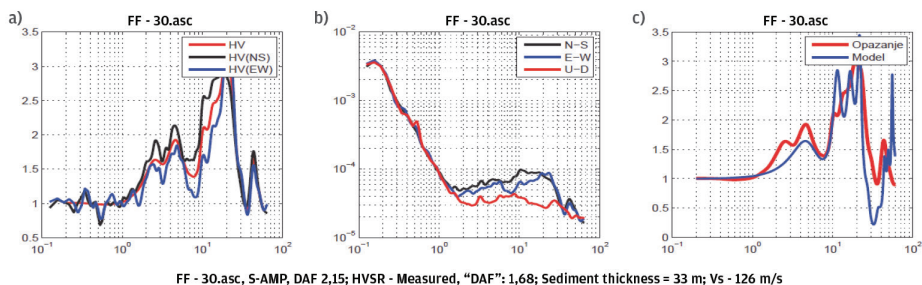
bijentalni seizmički šum ili mikroseizmički nemir koji se neprekidno generira urbanim, umjetnim i prirodnim izvorima [1].

Mjerenja seizmičke refrakcije obrađena su prema Delta-t-v-metodi i rezultati su prikazani u obliku 2D modela promjene brzina P-valova po dubini. Dobiveni modeli omogućili su razdvajanje materijala različitih mehaničko-fizičkih karakteristika do dubine od 50 m te izdvajanje potencijalnih pukotinsko-rasjednih zona [1].

Iz modela brzina S-valova za svaku mjerenu lokaciju izračunana je njihova prosječna brzina u prvih 30 metara dubine,  $v_{s30}$ , na temelju čega je izvršena klasifikacija tipova tla prema Eurokodu 8. Geofizička su mjerenja dakle dala izvrsne, prostorno konzistentne rezultate koji su mogli poslužiti za definiranje početnih modela pri inverziji mjerenja mikroseizmičkog nemira.

### 3.4 HVSR metoda

Metoda mjerenja mikroseizmičkog nemira (HVRS) u posljednja dva desetljeća pokazala se kao brza i jednostavna metoda za istraživanje odziva tla, tj. za određivanje rezonantne vlastite frekvencije tla i faktora amplifikacija [8, 9, 10]. Amplituda titranja (podrhtavanja) tla za vrijeme potresa može se povećati ili smanjiti ovisno o geološkoj strukturi tla (debljini sedimenata, dubina od osnovne stijene, razina podzemne vode) kroz koje seizmički valovi putuju. Meki površinski sedimenti zarobljavaju seizmičku energiju zbog razlike u impedanciji između mekog površinskog sloja i osnovne stijene, te pri tom dolazi do amplifikacije seizmičke pobude [11]. Poznavanjem rezonantne frekvencije osciliranja tla  $f_0$  i amplifikacije tla  $A_0$ , uz ponavljanje vlastitih frekvencija građevina, može se procijeniti opasnost ugroženosti pojave rezonancije tlo-građevina za vrijeme potresa [3]. Postignuta gustoća mjerenja mikroseizmičkog nemira (HVRS) od oko 3 točke/km<sup>2</sup> iz projekta [4] nije dovoljna zbog vrlo raznolike razdiobe geološke građe površinskih slojeva tla. Zbog toga je odlučeno provesti dodatna mjerenja mikroseizmičkog nemira kako bi se unutar pilot-područja dostigla gustoća od oko 5 mjernih točaka/km<sup>2</sup>.



Slika 4. Primjer rezultata obrade mjerenja mikroseizmičkog nemira na mjernoj točki broj 16 (FF-30):

- Opaženi HVSR spektri na dvije horizontalne komponente te rezultantni, izgladeni HVSR spektar;
- Fourierovi spektri amplituda za tri komponente gibanja tla;
- Opaženi HVSR spektar i HVSR spektar koji odgovara najboljem invertiranom modelu

U skladu s time, izvršeno je mjerenje mikrosezmičkog nemira na dodatnih 35 mjernih točaka (plavi kružići na slici 3.). Mjerenja su izvedena jednako kao i u prvoj fazi projekta [4], instrumentima tipa B (Tromino, proizvođača Micromed iz Italije). Osnovna priprema podataka i računanje HVSR-spektara napravljeni su računalnim programom Grilla (Micromed).

## 4 Zaključak

Izvedbom ovog pilot-projekta stečeno je iskustvo koje treba iskoristiti pri planiranju projekata potrebnih za provedbu seizmičkog mikrozoniranja preostalog teritorija Grada Zagreba. Pokazalo se da je to posao koji nužno zahtijeva multidisciplinarni pristup kako mjerenjima tako i interpretaciji rezultata. Rezultati geofizičkih istraživanja, mjerenja mikrosezmičkog nemira, interpretacije podataka dosadašnjih istraživanja, te provedenog inženjerskogeološkog mikrozoniranja u zapadnom dijelu zagrebačke podsljemenske zone sintetizirani su u kompilacijsku kartu seizmičkog mikrozoniranja za istraživano pilot-područje. Karta seizmičkoga mikrozoniranja u ovom se obliku može izravno primijeniti pri planiranju razvoja prostora, te projektiranju i izvedbi građevina u skladu sa standardima Eurokoda 8. Ovime grad Zagreb završava uvodnu fazu važnog projekta seizmičkog mikrozoniranja koji će u konačnici omogućiti izravnu primjenu suvremenih normi i propisa koji reguliraju protupotresnu gradnju na cijelom gradskom području. S obzirom na intenzitet i učestalost pojave potresa na području grada Zagreba kombinacijom geofizičko–geotehničko–geoloških istraživanja mogu se definirati parametri potrebni za protupotresnu gradnju. Projektiranje građevina bit će lakše, brže i jeftinije, jer za veliku većinu objekata neće biti potrebna dodatna seizmološka istraživanja, a planiranje razvitka prostora moći će se napraviti u skladu s lokalnim seizmičkim hazardom i očekivanim karakteristikama trešnje tla tijekom potresa.

## Literatura

- [1] Herak, M., Allegretti, I., Dasović, I., Fiket, T., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, K., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Podolszki, L., Sović, I., Stipčević, J.: Seizmičko i geološko mikrozoniranje prema standardima Eurokoda 8 za zapadni dio podsljemenske urbanizirane zone. Knjiga 1 - Seizmološka istraživanja i rezultati studije, Sveučilište u Zagrebu, Geofizički odsjek PMF-a, Zagreb (2013).
- [2] Miklin, Ž., Mlinar, Ž., Hećimović, I., Brkić, Ž.: Detaljna inženjerskogeološka karta podsljemenske urbanizirane zone. M 1: 5000 (DIGK - I faza). Hrvatski geološki institut. 70, 71, 72, 73, 74/07. Zagreb (2007).
- [3] Stanko, D., Strelec, S., Gazdek, M., Filipović, A.: Procjena odaziva tla mjerenjem mikrosezmičkog nemira u gradu Varaždinu, Inženjerstvo okoliša, 2 (2015) 1, pp. 45-54.



- [4] Herak, M., Allegretti, I., Dasović, I., Fiket, T., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, K., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Prevolnik, S., Sović, I., Stipčević, J.: Mjerenje i osnovna interpretacija mikroseizmičkog nemira na području Grada Zagreba, Elaborat o izvršenim mjerenjima, Sveučilište u Zagrebu, Geofizički odsjek PMF-a, Zagreb (2010).
- [5] Miklin, Ž., Podolszki, L.: Seizmičko i geološko mikrozoniranje prema standardima Eurokoda 8 za zapadni dio podsljemenske urbanizirane zone. Knjiga 2 - Geološka istraživanja, Hrvatski geološki institut, Zagreb (2013).
- [6] HRN EN 1998-1: Eurokod 8 - Projektiranje konstrukcija otpornih na potres - 1 dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004), 2008.
- [7] Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J.: Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64 (1999) 3, pp. 800-808.
- [8] Bard, P-Y.: Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? *Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion* (1998). Yokohama, Japan, 3, pp. 1251-1279.
- [9] Gosar, A.: Microtremor HVSr study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw 5,6 and 2004 Mw 5,2 earthquakes. *Engineering Geology*, 91 (2007), pp. 178-193.
- [10] Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I.: Seismic hazard map of Croatia in free-field return period (<http://sezikarta.gfz.hr/>)
- [11] Elnashi, A.S., Di Sarno, L.: *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Wiley, UK (2008)

# Modeliranje dugotrajnih deformacija stijenskog masiva oko podzemnog otvora

Zvonimir Maranić<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, [zmaranic@grad.hr](mailto:zmaranic@grad.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, [msk@grad.hr](mailto:msk@grad.hr)

## Sažetak

Stijenska masa koja je uključena u primarni podgradni sustav tunela izložena je dugotrajnom opterećenju. Zbog puzanja stijenske mase dolazi do prijenosa opterećenja na sekundarnu oblogu. Mjerenja deformacija izvedenih cestovnih tunela u Republici Hrvatskoj pokazala su znatne deformacije za vrijeme eksploatacije. Za analizu uzroka prirasta deformacija rabe se numerički modeli koji uključuju i reološke karakteristike stijenskog masiva, kojima se na temelju numeričkih povratnih analiza mogu utvrditi mehanizmi dugotrajnog ponašanja i deformiranja tunelskoga podgradnog sustava.

*Ključne riječi: tunel, podzemni otvor, dugotrajne deformacije, reološki model, numerička simulacija*

## Modelling of long-term deformations in rock mass around tunnel opening

### Abstract

The rock mass involved in the primary tunnel support is exposed to long-term loads. Due to rock mass creep, the load imposed on primary tunnel support is redistributed onto the secondary tunnel lining. Strain measurements conducted on existing road tunnels in Croatia have revealed the occurrence of considerable strains during tunnel use. Numerical models for analysing the causes of large tunnel lining strains also make use of rheological characteristics of the rock mass which, based on back numerical simulations, enables determination of mechanisms of long-term behaviour and deformation of the tunnel support system.

*Key words: tunnel, underground opening, long-term strains, rheological model, numerical simulation*

## 1 Uvod

Kao rezultat iskustva, niza mjerenja na tunelima i teorijskih razmatranja razvijena je NATM (New Austrian Tunneling Method) kao metoda iskopa podzemnih građevina većih profila bez privremene podgrade. Danas se u Republici Hrvatskoj svi tuneli izvode prema NATM. Prema osnovnim postavkama NATM primarna tunelska podgrada služi za trajno osiguranje tunelskog profila i u interakciji sa stijenskim masivom mora preuzeti cjelokupno opterećenje. U skladu s tim sekundarna tunelska obloga ne preuzima nikakvo značajnije opterećenje. Međutim, na stanje naprezanja i deformacija sekundarne obloge utječe nekoliko faktora čiji se utjecaj nikako ne može zanemariti. Stijenska masa koja je uključena u primarni podgradni sustav izložena je dugotrajnom opterećenju i različitim režimima podzemnih voda. Zbog puzanja, bujanja ili rastrožbe dolazi do povećanog opterećenja na primarnu podgradu te prijenosa opterećenja na sekundarnu oblogu. Primarna betonska podgrada opterećena iznad polovice svoje čvrstoće imat će znatne viskozne deformacije puzanja, a rezultat toga bit će uključivanje sekundarne obloge u proces zaustavljanja deformacija stijenskog masiva. Čelična sidra, naročito ona bez zaštite, nakon većih deformacija izvrgnuta su intenzivnoj koroziji te nakon toga potpuno zakazuju. To dovodi do slabljenja primarnog podgradnog sustava i prijenosa opterećenja na sekundarnu oblogu [1].

## 2 Deformacije tunelske obloge

### 2.1 Mehanizam dugotrajnog deformiranja stijene oko tunelskog otvora

Dugotrajno deformiranje stijenske mase je razmjerno česta pojava kod podzemnih objekata, te se uglavnom uočava kod mekih ili izrazito razlomljenih stijena, koje su izložene značajnim promjenama naprezanja. Deformacije stijenskog masiva uglavnom su uzrokovane promjenom početnog, geološkog stanja naprezanja, nastalom zbog pre-raspodjele naprezanja nakon iskopa. U slučaju kompaktnih stijenskih masa ostvarene deformacije imaju elastičan karakter, te njihova vrijednost ostaje u granicama do 1% polumjera tunela. Kod razlomljenih (trošnih) stijenskih masa u slučaju sloma dolazi do formiranja zone popuštanja oko ruba otvora, odnosno do procesa plastičnoga deformiranja. Pod terminom dugotrajnoga deformiranja stijenske mase podrazumijevaju se različiti vremenski ovisni procesi: puzanje (eng. creep), gnječenje (eng. squeezing), bubrenje (eng. swelling), konsolidacija (eng. consolidation) i itd., na koje može utjecati više faktora. Ti faktori mogu biti: čvrstoća stijenske mase, početno geološko stanje naprezanja, vrijednost pornih tlakova, propusnost, mineralogija, orijentacija diskontinuiteta, tehnologija izvedbe, brzina napredovanja, vrsta podgrađivanja itd.

Iako uzroci dugotrajnog deformiranja stijenske mase još uvijek nisu u potpunosti razumljivi, glavna posebnost procesa puzanja je vremenski ovisno ponašanje (deformiranje) stijenske mase. Ovo vremenski ovisno ponašanje u literaturi se objašnjava na dva načina, puzanjem zbog prekoračenja granične posmične čvrstoće stijene ili konsolidacijom zbog disipacije

pornih tlakova u stijenskim masama slabe propusnosti. Proces gnječenja je u biti karakteriziran istim procesima kao i puzanje, s razlikom da iskop tunela uzrokuje iznimno velike deformacije stijenskoga masiva oko podzemnog otvora, koje se ostvaruju tijekom, ali i znatno nakon završetka iskopa. Međunarodno Društvo za Mehaniku Stijena (ISRM) definiralo je termin "gnječenje stijene" (eng. squeezing of rock) kao značajne, vremenski ovisne, konvergencije ruba tunela tijekom iskopa. Zbog velikih deformacija stijenskoga masiva dolazi do značajne redukcije poprečnog presjeka (slika 1.) tijekom izgradnje tunela.



Slika 1. Redukcija poprečnog presjeka uzrokovana gnječenjem stijenske mase u okolini otvora željeznikog tunela Lyon-Torino, [2]

Prostorne zone koje su podložne gnječenju izrazito su nepredvidive, te se mogu pojavljivati i na vrlo kratkim dionicama tunela. Iako je gnječenje u osnovi vremenski ovisan proces, u geotehničkom projektiranju takva se stijenska masa reprezentira kao ekvivalentni elasto-plastični materijal s reduciranim vrijednostima čvrstoće i krutosti. Jedini je ispravan pristup projektiranju stijenske mase koja je podložna puzanju uporaba konstitucijskih modela koji uvažavaju vremenski ovisne deformacije.

Bubrenje je vremenski proces povećanja volumena materijala zbog upijanja vode minerala gline (montmorilonit), koje se u slučaju iskopa tunela uglavnom odvija bez popuštanja stijenskoga materijala. Povećanje volumena, odnosno volumenska deformacija materijala u većini se slučajeva ostvaruje kao izdizanje dna tunela, što uzrokuje velike probleme tijekom i nakon izvedbe tunela.

Može se zaključiti da veličina konvergencija ruba otvora, brzina deformacije stijenske mase, te doseg zone popuštanja oko tunelskoga otvora ovisi o geološkim uvjetima u podzemlju, režimu tečenja podzemne vode i pornim tlakovima, o fizičko-mehaničkim svojstvima stijenske mase te o načinu iskopa i primijenjenom načinu podgrađivanja. Ako se odgađa ugradnja podgradnoga sklopa, stijenska se masa brže deformira, a time i sam proces preraspodjele naprezanja oko podzemnog otvora traje kraće. Nasuprot tome, ako se spriječi deformacija stijenske mase (npr. trenutnim podgrađivanjem), proces preraspodjele naprezanja duže će trajati, a samim time i proces deformiranja primarnog podgradnog sklopa. Značajne konvergencije ruba otvora zbog dugotrajnih deformacija stijenske mase mogu uzrokovati ozbiljna oštećenja podgradnog sklopa, čime se ugrožava stabilnost i funkcionalnost podzemnog objekta.

## 2.2 Mjerenje deformacija u tunelogradnji

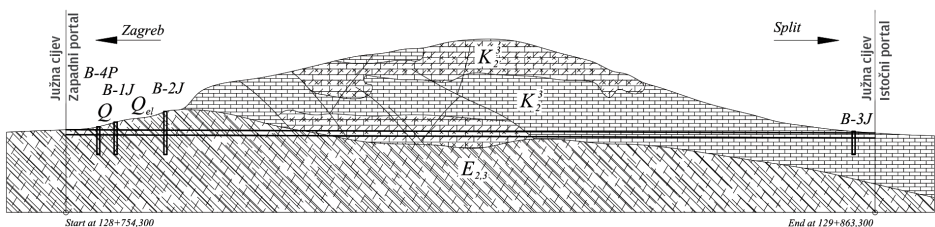
Mjerenja u tunelogradnji općenito se dijele u tri skupine: kontrolna mjerenja koja prate deformacije podzemnoga iskopa radi osiguranja radnika i konstrukcije, podgradna mjerenja koja prate pomake stijenske mase oko podzemnog iskopa i deformacije i naprezanja u elementima podgradnog sklopa radi optimizacije svih mjera na iskopu i stabilizacije iskopa te stabilizacijska mjerenja koja prate deformacije i naprezanja sekundarne betonske obloge radi dokaza stabilnosti tunela. Svrha geotehničkih mjerenja je, osim kontrole kvalitete izvedenih radova i provjere uspješnosti projektnog rješenja, omogućiti interaktivno projektiranje, odnosno tzv. drugu fazu projektiranja modificiranjem projektnoga rješenja za vrijeme izvedbe na temelju rezultata mjerenja. Kvaliteta provedenih mjerenja ovisi o mjernom sustavu koji čine mjerna oprema, instalacija i ugradnja mjerne opreme, iskustvo i obučenost osoblja koje izvodi mjerenja, procedura i provođenje mjerenja, obrada rezultata mjerenja te prikaz i interpretacija rezultata mjerenja. Uspješnost geotehničkih mjerenja ovisi o eliminiranju ili o što je moguće većem smanjenju grešaka mjerenja.

## 2.3 Provedena mjerenja deformacija cestovnih tunela u Hrvatskoj

Mjerenja deformacija izvedenih cestovnih tunela u Republici Hrvatskoj pokazala su znatne priraste naprezanja i deformacija za vrijeme eksploatacije [1]. Ponašanje stijenske mase, opažano u podzemnim građevinama, ponekad ukazuje na veće "zakašnjele" deformacije koje mogu dovesti do sloma u stijenskoj masi. Ovaj fenomen ilustrira dugotrajno, viskozno ponašanje stijene i progresivno oštećenje koje se pojavljuje nakon preraspodjele naprezanja u okolini otvora. Zakašnjeni slom može se pojaviti nekoliko sati ili nekoliko godina poslije iskopa.

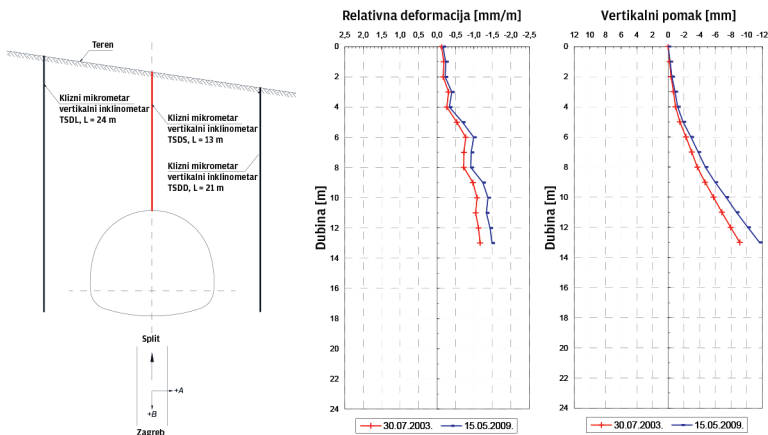
### 2.3.1 Tunel Konjsko

Tunel Konjsko nalazi se na dionici Prgomet-Dugopolje autoceste Zagreb-Split. Čine ga dvije tunelske cijevi s dva vozna traka. Duljina sjeverne cijevi iznosi 1326,0 m, a južne 1133,8 m. Istražnim radovima u širem okolišu tunelskih cijevi izdvojene su vapnenačke te klastične naslage fliša (slika 2.).



Slika 2. Inženjersko-geološki profil južne cijevi tunela Konjsko

Nakon šest godina od zadnjega mjerenja deformacija (30. 7. 2003.) provedena su dodatna mjerenja (15. 5. 2009.) vertikalnih i horizontalnih pomaka tla u zoni tunela s površine terena na južnoj cijevi tunela Konjsko. Mjerenje horizontalnih pomaka vršeno je inklinometrom, a mjerenje vertikalnih pomaka kliznim mikrometrom (slika 3.).



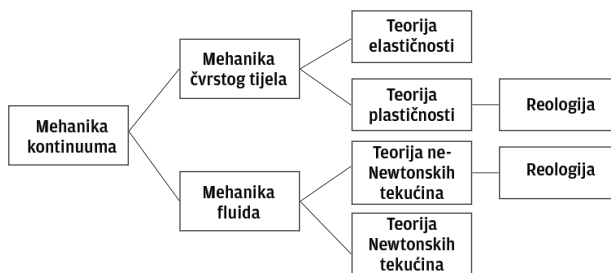
Slika 3. Mjerni profil na ST 128+829, vertikalne deformacije i pomaci u srednjoj mjernoj cijevi

Iako su mjerenja nakon završetka tunela pokazivala potpuni prestanak prirasta deformacija, mjerenja provedena šest godina kasnije pokazala su značajne priraste deformacija, pri čemu su vertikalni pomaci porasli za oko 28 %.

### 3 Modeliranje dugotrajnih deformacija stijenske mase

#### 3.1 Uvod u reologiju

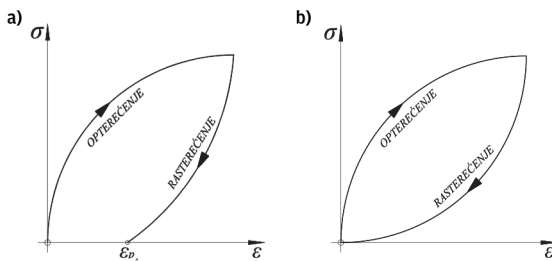
Znanost koja proučava vremenski ovisnu deformaciju materije naziva se reologijom. Osnovni je cilj reologije definiranje zakona koji opisuje odnos između naprezanja i deformacije materije u vremenu. Reologija se uglavnom bavi proširenjem klasičnih disciplina teorije elastičnosti i mehanike fluida na mehaničko ponašanje materijala koje se može opisati klasičnim teorijama (slika 4.).



Slika 4. Proširenje klasičnih teorija u mehanici kontinuuma na teoriju reologije

U prirodi se materija pojavljuje s elastičnim, viskozim i plastičnim svojstvima te njihovim sinergijama, pri čemu neke od tih osobina mogu biti zastupljene u većoj, a druge u manjoj mjeri. Ta svojstva se pod djelovanjem "vanjskih" utjecaja javljaju istodobno ili jedna za drugima. Stvarno ponašanje materije ponekad je izrazito kompleksno, pa su stoga i veze deformacija i naprezanja složene. Klasična mehanika kontinuuma, u prošlosti, poznavala je dvije vrste materijala, elastična čvrsta tijela (Hookeovo tijelo) i idealne fluide (Newtonski fluid).

Detalnija su ispitivanja pokazala da u skupini elastičnih čvrstih materijala gotovo uvijek ima viskoznih (npr. viskoelastičnost) ili drugih neelastičnih pojava (npr. viskoplastičnost), pa znanost o reologiji razmatra upravo takve pojave. Viskoelastičnost je svojstvo materijala koje iskazuje viskozne i elastične karakteristike tijekom promjene stanja naprezanja. Viskozni materijali pod utjecajem naprezanja pružaju otpor posmičnom tečenju te se deformiraju u vremenu. S druge strane, materijali s elastičnim svojstvima deformiraju se "trenutačno" i vraćaju se u prvobitni oblik nakon uklanjanja opterećenja. Viskoelastični materijali posjeduju oba svojstva i kad su izloženi naprezanju, karakteriziraju ih vremenski ovisne deformacije. Viskoplastičnost je svojstvo materijala da iskazuje "neelastično" ponašanje kada ga se podvrgne promjeni stanja naprezanja. Neelastično ponašanje karakterizira plastična deformacija, što znači da se materijal počinje nepovratno, plastično deformirati kada je izložen razini naprezanja iznad čvrstoće materijala (slike 5a. i 5b.).

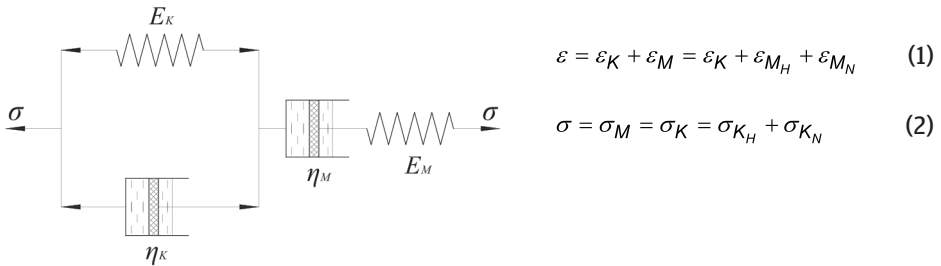


Slika 5. a) Karakteristično viskoplastično ponašanje; b) Karakteristično viskoelastično ponašanje

Hookeov i Newtonov zakon pretpostavljaju linearnu proporcionalnost između naprezanja i deformacija ili brzine deformacije, bez obzira na razinu naprezanja. Ovo implicira da je viskoelastično ponašanje također linearno, s primjenom ograničenom samo na određene materijale i uvjete pod kojima se nalaze. Raspon naprezanja u kojemu se materijal ponaša linearno uvijek je ograničen i njegova gornja granica može imati jako nisku vrijednost. Drugim riječima, vrijednosti fizičko-mehaničkih svojstava materijala, kao što su krutost i viskoznost, mogu se drastično mijenjati u odnosu na primijenjeno naprezanje, koje i ne mora imati veliku vrijednost. Promjena vrijednosti fizičko-mehaničkih svojstava materijala može nastupiti trenutačno ili u duljem vremenskom razdoblju, a može se manifestirati kao povećanje ili kao pad vrijednosti parametara. Sve ovo upućuje na izrazitu nelinearnost gotovo svih materijala koji se pojavljuju u prirodi te ovisnost fizičko-mehaničkih parametara o stanju naprezanja.

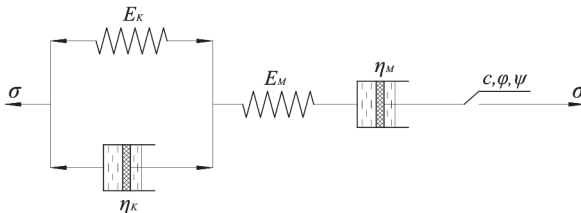
### 3.2 Burgerov reološki model

Burgerov model [3] spada u skupinu složenih mehaničkih modela, a simboliziran je serijskim spojem Kelvinovoga i Maxwellovog modela (slika 6.). U slučaju jednodimenzionalnoga opterećenja deformacije se oba modela zbrajaju (1), dok su naprezanja jednaka (2). Strukturna formula Burgerovoga viskoelastičnog modela piše se u obliku  $B = K - M$ .



Slika 6. Burgerov viskoelastični model

Model CVISC [4] predstavlja modifikaciju Burgerovog modela u kojemu je serijski spojenim Kelvinovim i Maxwellovim modelom dodan plastični Mohr-Coulombov element (slika 7.). Spada u skupinu viskoelastoplastičnih modela.



Slika 7. Model CVISC

Kriterij sloma u plastičnom elementu odvija se, kao i kod prethodnoga modela, prema pretpostavkama Mohr-Coulombovog kriterija sloma. Mehaničko se ponašanje također razdvaja na devijatorsku i volumnu komponentu. Volumno se ponašanje pretpostavlja samo kao elastoplastično, koje je pod kontrolom linearnoelastičnoga zakona i zakona plastičnog tečenja, dok devijatorsku komponentu karakterizira viskoelastoplastično ponašanje. Može ga se rabiti za opisivanje trenutačne deformacije te procesa primarnoga i sekundarnog puzanja. Ispravnim određivanjem fizičko-mehaničkih parametara može u potpunosti zadovoljiti potrebe projektiranja u praksi, dok se kod znanstvenih istraživanja može rabiti kao usporedni model.

Za potrebe razvoja novoga reološkog modela za predviđanje dugotrajnih deformacija tunelske obloge u kršu koristit će se varijanta reološkog modela CVISC u kojem je kriterij sloma Hoek-Brownov kriterij dan sljedećom jednadžbom (3):



$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3)$$

gdje su:

- $\sigma_1$  - veće glavno naprezanje [MPa],
- $\sigma_3$  - manje glavno naprezanje [MPa],
- $\sigma_{ci}$  - jednoosna tlačna čvrstoća [MPa],
- $m_b, s, a$  - konstante materijala [-].

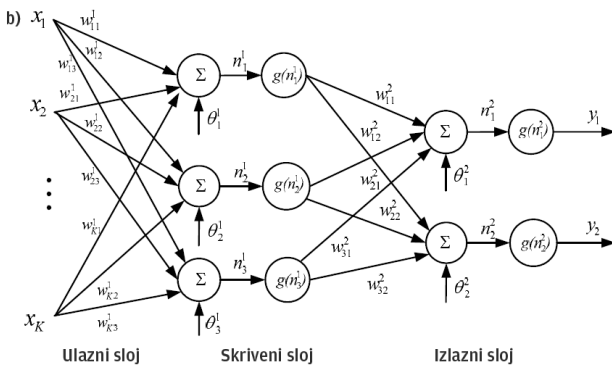
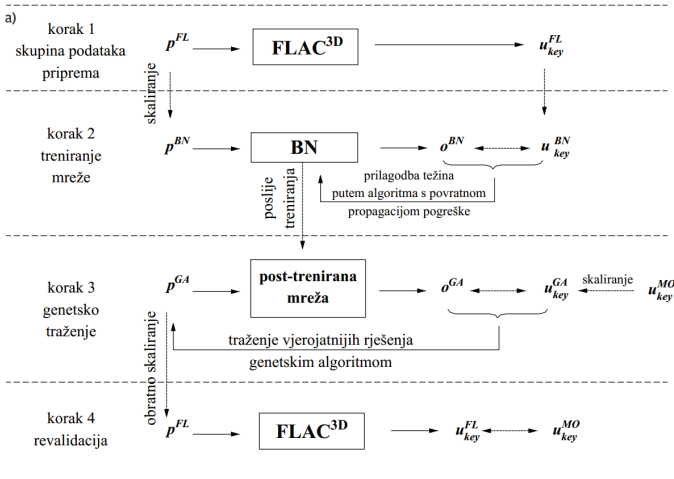
### 3.3. Određivanje parametara reološkog modela povratnim analizama

Razvijeni su različiti pristupi opisivanja vremenski ovisnoga ponašanja stijenske mase. Reološki modeli kontinuuma, kao jedan od najčešće primjenjivanih pristupa, zahtijevaju poznavanje određenih fizičko-mehaničkih parametara. Kad se ovi parametri jednom odrede, mogu se integrirati u numerički model. Sasvim je jasno da je pouzdano određivanje vrijednosti tih parametara vrlo važno za ispravno modeliranje dugotrajnoga ponašanja. Među navedenim procedurama određivanja parametara, mehanička su ispitivanja (laboratorijska ili terenska ispitivanja) najpouzdanija. Terenska ispitivanja mogu zahvaćati veći volumen, te kao takva mogu dovoljno točno reprezentirati ponašanje stijenske mase. Nedostatak tih ispitivanja ogleda se u velikoj cijeni te su nepraktični u većini slučajeva. U dosadašnjoj praksi većinom se rabe rezultati laboratorijskih ispitivanja, a u rijetkim slučajevima i rezultati terenskih ispitivanja, koji, iako su obavljani na malim volumenima stijene, mogu omogućiti prihvatljive rezultate. Glavni nedostatak laboratorijskih ispitivanja leži u činjenici da tako određeni parametri odgovaraju intaktnoj, homogenoj stijeni, te kao takvi nikako ne mogu reprezentirati stijensku masu. Ovu je razliku potvrdio veći broj istraživača, te u slučaju relativno homogene stijenske mase razlika iznosi i do nekoliko eksponenata [5]. Prema autorima Chinu i Rogersu [6] određivanje vrijednosti parametara klasičnih reoloških konstitucijskih modela predstavlja izuzetno kompleksnu zadaću, te je prema njima jedini ispravan način određivanja parametara provođenje povratnih analiza na osnovi rezultata mjerenja.

Povratne se analize u geotehničkom inženjerstvu rabe za određivanje prosječnih fizičko-mehaničkih parametara tla/stijenske mase primjenjujući rezultate opažanja tijekom izvedbe radova. Ova praktična tehnika omogućava projektantima provjeru ulaznih podataka o fizičko-mehaničkim parametrima, te u slučaju većih odstupanja odluku o eventualnom ojačanju podgradnog sklopa. Kao takva, neizostavan je dio interaktivnoga projektiranja u sklopu izvedbe tunela. Kod vremenski ovisnoga ponašanja stijenske mase ova tehnika ima posebnu važnost. Povratne analize omogućavaju uvid u realne vrijednosti (na nivou veličine tunelskog iskopa) različitih parametara konstitucijskih reoloških modela. Također se mogu iskoristiti u cilju kalibracije vrijednosti parametara dobivenih u laboratoriju na veći volumen.

Chi-Wen [5] u svojem je istraživanju puzanja stijenske mase zaključio da uporabom rezultata mjerenja deformacija tunela te uvažavajući rezultate laboratorijskih ispitiva-

nja puzanja, definira najpraktičniji pristup u određivanju realnih parametara stijenske mase. Guan [7] je predložio proceduru kojom se povratnim numeričkim analizama, koje su provedene na osnovi rezultata mjerenja konvergencija sekundarne obloge te primjenom neuralnih mreža i genetičkih algoritama, određuju viskoelastični parametri stijenske mase. Predložena procedura sastavljena je od četiri koraka, a shematski je prikazana na slici 8a.



Slika 8. a) Procedura određivanja reoloških parametara; b) Neuralna mreža

U prvom koraku simulira se iskop tunela, nakon čega slijedi analiza puzanja, a na osnovi pretpostavljenih reoloških parametara. Izračunane konvergencije pohranjuju se u bazu podataka. Proračun se nastavlja mijenjajući reološke parametre. Nakon zadovoljavajućega broja parova pretpostavljenih parametara i njima odgovarajućih konvergencija trenira se neuralna mreža (slika 8b.), nakon čega se setovi reoloških parametara, za izmjerene konvergencije, odabiru genetičkim algoritmima. Odabrani setovi se potvrđuju ponovnom numeričkom simulacijom iskopa tunela.

## 4 Zaključak

Mjerenja deformacija oko podzemnih otvora u Republici Hrvatskoj pokazala su znatne pri-raste naprezanja i deformacija za vrijeme eksploatacije kako u primarnoj podgradi tako i u sekundarnoj oblozi [8]. U tunelima Pod Vugleš, Javorova kosa, Hrastovec, Vrtlinovec, Konjsko, Dubrave, Sv. Kuzam, Bobova i Pećine, koji su izvedeni u karbonatnim stijinama, povremeno se obavljaju mjerenja deformacija stijenskog masiva i sekundarne obloge. Da bi se pouzdanije prognozirao karakter i veličina dugotrajnih deformacija oko podzemnih otvora neophodno je analizirati mehanizme koji mogu dovesti do takvog ponašanja primarne podgrade i sekundarne obloge. Primarna betonska podgrada opterećena iznad polovice svoje čvrstoće imat će znatne viskozne deformacije puzanja, a rezultat toga bit će uključivanje sekundarne obloge u proces zaustavljanja deformacija stijenskog masiva. Stijenska masa koja je uključena u primarni podgradni sustav izložena je dugotrajnom opterećenju što neminovno izaziva dugotrajne deformacije i prijenos opterećenja na sekundarnu oblogu. Rezultat ovih istraživanja ogledao bi se u pouzdanijem predviđanju dugotrajnog ponašanja stijenske mase primjenom postojećih ili razvojem novih modela ponašanja pojedinih elemenata podgradnoga sustava pod dugotrajnim opterećenjem. Također se očekuju i sljedeći doprinosi takvog rada: objašnjenje mehanizama koji utječu na veličinu i karakter dugotrajnih deformacija stijenske mase oko podzemnih otvora; drugo, unapređenje ispitivanja i određivanja reoloških svojstava stijenske mase; i, kao zadnje, očekuje se doprinos u obliku unapređenja tehnologije i interpretacije geotehničkih mjerenja dugotrajnih deformacija stijenske mase oko podzemnih otvora.

## Literatura

- [1] Kovačević, M.S., Arapov, I., Lušo, P., Kuželički, R.: Povratne numeričke analize u tunelu Pećine, 4. Savjetovanje HGD-a Ojačanje tla i stijena, 5.-7. listopada 2006., Opatija, Hrvatska, pp. 143-152.
- [2] Innovative tunnelling construction methods in squeezing rock, [http://www.tunnel.ethz.ch/events/barla\\_1](http://www.tunnel.ethz.ch/events/barla_1)
- [3] Burgers, J.M.: Mechanical consideration - model systems - phenomenological theories of relaxation and of viscosity First Report on Viscosity and Plasticity, 2<sup>nd</sup> Edition, Nordemann Publishing Company, pp. 5-72, 1939.
- [4] ITASCA (2006) FLAC Theory and Background. ITASCA Consulting Group Inc., Minneapolis
- [5] Chi-Wen, Yu.: Creep characteristics of soft rock and modelling of creep in tunnel. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bradford, U. K., 1998.
- [6] Chin, H.-P., Rogers, J.D.: Creep parameters of rocks on an engineering scale. Rock Mech. Rock Eng. 20, pp. 37-146, 1987.
- [7] Guan, Z., Jiang, Y., Tanabashi, Y., Huang, H.: A new rheological model and its application in mountain tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, 23 (2008) 3, pp. 292-299
- [8] Arapov, I., Kovacevic, M.S., Luso, P.: Monitoring and back numerical analyses in the Konjsko tunnel. In Proce. EUROCK 2009, Rock Engineering in Difficult Ground Conditions - Soft Rocks and Karst, Dubrovnik, pp. 533-538, 2009.

# Implementacija i utjecaj standardiziranja informacijskog modeliranja gradnje (BIM) na građevinske poslovne sustave

Martina Pavlović<sup>1</sup>, doc.dr.sc. Mladen Vukomanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Intelika d.o.o., [martina.pavlovic@intelika.hr](mailto:martina.pavlovic@intelika.hr)

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

## Sažetak

U radu će se dati preliminarni pregled literature o implementaciji "Building Information Modeling" tehnologije u organizacije građevinske industrije. Prikazat će se najčešće barijere pri implementaciji BIM-a, benefiti te standardi kao ključne stavke dostizanja glavnog cilja BIM-a - kvalitetne kolaboracije. Iako svjetska praksa dokazuje potrebu standardiziranja BIM-a, u Hrvatskoj trenutno ne postoje nacionalno prihvaćeni BIM standardi. Stoga će se u radu proučavati internacionalni BIM standardi, ključni faktori uspjeha i rizici prilikom implementacije te kontrolne varijable za modeliranje standarda na hrvatskom tržištu. Na kraju će se predložiti istraživački okvir doktorskog rada koji će objasniti metodologiju i ciljeve istraživanja.

*Ključne riječi: Building Information Modeling, BIM, implementacija, organizacijske promjene, standardi, kolaboracija, projektni sudionici*

## Implementation and impact of Building Information Modelling (BIM) on construction business systems

### Abstract

A preliminary literature overview on implementation of the "Building Information Modelling" technology in construction industry is given in the paper. The authors present the most common obstacles during BIM implementation, as well as BIM benefits and adoption of standards, as key items for achieving the main goal in BIM - high quality of collaboration. Although international practice shows the need for BIM standardization, there are currently no nationally accepted BIM standards in Croatia. Thus, this paper focuses on the study of international BIM standards, on key success factors and risks during implementation, and on control variables for modelling standards on Croatian market. The research framework of doctoral thesis, with explanation of the research methodology and objectives, is presented in the final part of the paper.

*Key words: Building Information Modelling, BIM, implementation, organizational changes, standards, collaboration, stakeholders*

## 1 Uvod

Izvješće Nacionalnoga instituta za standarde i tehnologiju (engl. National Institute of Standards and Technology-NIST) 2004. godine pokazalo je kako manjak interoperabilnosti i lošije upravljanje dokumentima godišnje građevinsku industriju košta oko 18,3 milijardi dolara [1]. Na temelju tog izvješća, sve je veći fokus bio na pronalasku i uporabi novoga sustava/tehnologije koji će umanjiti nepotrebne gubitke vremenskih i novčanih resursa organizacija. Mnoge su se struke opredijelile za informacijsko modeliranje gradnje kao učinkovitije rješenje u radu na građevinskim projektima [2]. Uporabom nove tehnologije i sistema rada uslijedio je daljnji razvoj rada, razrada standarda i procesa koji prate novo rješenje iza čije kratice "BIM" stoji pojam "Building Information Modeling".

Američki nacionalni BIM standard objavio je 2007. godine izvještaj koji BIM definira kao "digitalnu prezentaciju fizičkih i funkcionalnih karakteristika objekta" [3]. Današnja literatura daje mnoge definicije BIM-a, kao što su: "BIM su procesi koji se rabe za razmjenu informacija o objektu, stvarajući pri tome bazu koja se rabi za donošenje odluka tijekom daljnjeg životnog vijeka objekta" [2]. Odnosno, "BIM su procesi, moderni procesi organizacije građenja koji omogućuju korisnicima izgradnju multidimenzionalnog, parametriziranog modela koji služi kao alat za upravljanje građevinskim projektima tijekom njihovog cjeloživotnog vijeka" [4]. Eastman et al. (2011) smatraju da je koncepcija parametriziranih objekata ono ključno za razumijevanje BIM-a i njegove razlike u odnosu na tradicionalne 3D objekte [5]. Parametarasko modeliranje je stvaranje digitalnoga modela utemeljenog na nizu unaprijed programiranih pravila i algoritama, tzv. "parametara". Karakteristike BIM parametriziranih objekata su sljedeće [5]:

- sadrže geometrijske definicije te pridružene informacije i pravila,
- geometrija je suvisla i omogućava dosljednost (npr. oblik objekta u 3D pogledu, njegovi tlocrti i presjeci moraju biti dosljedni, dimenzije se ne mogu "lažirati"),
- parametrička pravila objekata automatski modificiraju geometriju s kojom su povezani (npr. vrata se automatski ugrađuju u zid).

BIM-om se prati cjeloživotni vijek jednog projekta, izgradnjom baze podataka unutar koje svaka od struka/sudionika na projektu integrira svoje informacije i rabi tuđe kako bi potpomogli projektu za razvoj njegovih daljnjih faza. Drugim riječima, BIM može pratiti projekt od njegove inicijalne faze, koncipiranja, kroz daljnje faze analiziranja, projektiranja, planiranja, izgradnje, predaje objekta, upravljanje objektom te u konačnici rušenja. Na taj način potiče i integraciju i kolaboraciju struka. Ovaj istraživački rad usmjeren je proučavanju BIM implementacije na internacionalnoj razini, opsegu i strukturi najpoznatijih BIM standarda u svijetu, benefitima i glavnim ciljem BIM tehnologije, te trenutnim stanjem implementacije u Republici Hrvatskoj, s idejom prezentiranja istraživačkog okvira metodologije izrade hrvatskog nacionalnog BIM standarda. Kroz rad će se dati pregled literature iz područja BIM implementacije, s fokusom na benefite

i cilj BIM tehnologije te standarde koji se rabe kako bi se ostvario cilj BIM-a. Na temelju proučene literature prezentirat će se strategije BIM implementacije u svijetu i najčešće barijere u implementaciji te uvaženi model razina BIM zrelosti. Za kraj će se predstaviti prijedlog istraživačkog okvira doktorskog rada te zaključiti o trenutnoj situaciji usvajanja BIM tehnologije u Hrvatskoj i predstaviti buduće korake.

## 2 Sustav implementacije BIM tehnologije u organizacijama s područja građevinske industrije

U praksi su prepoznate prednosti koje donosi BIM tehnologija, te se samom implementacijom rješavaju ili umanjuju problemi koji se javljaju u radu s građevinskim projektima, projektnim menadžmentom i upravljanjem i održavanjem objekata [6]. Kushwaha (2016) navodi najčešće benefite BIM tehnologije – 3D vizualizacije s preciznom geometrijom te jasnom vizualizacijom budućeg objekta, parametricizam kojim se pruža mogućnost dodatne prilagodbe inteligentnih objekata (elemenata modela) i ugradnja informacija za daljnji razvoj projekta, platforma koja služi za bržu i bolju komunikaciju (kako između sudionika, tako i između faza projekta), brže i točnije izrade rasporeda i tablica količina za procjenu troškova, istaknutije upravljanje promjenama i analizama sudara elemenata objekta, pristup analizama održivosti modela te priprema za upravljanje i održavanje objektima, kao i mnoge druge benefite koji pomažu razvoju svake faze projekta [6]. S druge strane, samo uvođenje nove tehnologije vrlo je riskantno i zahtjeva puno resursa. Tehnologija i kvaliteta BIM alata bili su problem 10 godina, ali danas je moguća jednostavna i uspješna BIM implementacija [4]. Implementacija ne podrazumijeva samo prebacivanje s jedne vrste alata na drugu, ona podrazumijeva reorganizaciju posla, postavljanje novog standarda rada i to od menadžerskog nivoa pa sve do tehničkog. Nakon što se dosegne standardizacija unutar organizacije, dosadašnja praksa pokazala je da se zbilja dosegne i željena razina kolaboracije [7]. Za složene i vrlo raznolike organizacije uspješna provedba BIM-a predstavlja različite izazove na svakoj organizacijskoj razini i zahtijeva pažljiv i strukturirani pristup koji uzima u obzir mnoge integrirane komponente poslovanja organizacije [8]. Autodesk (2015) ističe da bi BIM implementacija bila što učinkovitija, bitno je da se primijeni kroz cijelu organizaciju, a ne samo kroz dio, odnosno samo kao inicijativa određenog odjela npr. odjela za istraživanje i razvoj. Takav pristup, implementacije samo dijela organizacije, Autodesk naziva "Lonely BIM", i ističe da pristup donosi neke "rezultate", ali na kraju ne transformira poslovanje, odnosno isporučuje samo dio obećanih BIM benefita. U cilju iskorištavanja svih potencijala BIM-a potrebne su promjene u organizaciji, radnoj praksi i vještinama sudionika na projektu [9]. BIM generira promjenu te je okarakteriziran multidimenzionalnošću, odnosno može se opisati ne samo s tehnološkog gledišta nego i s organizacijskog [11]. Unutar tog okvira, BIM implementacija se opisuje kao progresivni razvoj interakcije politike, procesa i tehnologije koja utječe na različite sudionike i organizacije [12].

Bitno je da organizacija razumije i vidi potencijal BIM tehnologije u svim aspektima, od poboljšanja komunikacije i koordinacije sa sudionicima na projektu, pa do povećanja interne produktivnosti. S obzirom na sve prednosti koje BIM nudi, važno je biti svjestan i trenutnih ograničenja te tehnologije.

Godine 2014. provedeno je internacionalno istraživanje o strategijama implementacije BIM tehnologije unutar organizacija [13]. U nastavku slijedi tabelarni prikaz sustava strategija te najkorištenijih unutar pojedine zemlje (tablica 1.).

Tablica 1. Strategije za poticanje primjene BIM-a, prema državama [13]

Strategije za poticanje primjene BIM-a \ Države	Hong Kong	Njemačka	Australija	Novi Zeland	Velika Britanija	SAD	Singapur	Malezija (rezultat interesne skupine)
Osigurati izobrazbu	✓	✓	✓	✓	✓			✓
Investitori trebaju tražiti BIM/podrška Vlade	✓		✓	✓		✓	✓	
Povećati svijest o potrebi uvođenja metode BIM	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Izraditi upute za primjenu metode BIM	✓						✓	✓
Poboljšati norme za razmjenu podataka		✓	✓					
Obaviti poboljšanja u visokoškolskom obrazovanju		✓				✓	✓	✓
Smanjiti troškove/pružiti povoljne mogućnosti			✓	✓			✓	
Obaviti promjene u načinu ugovaranja				✓		✓		

## 2.1 Poteškoće (barijere) u implementaciji BIM tehnologije

U sklopu istraživačkog okvira doktorske disertacije pregledana je literatura o najčešćim barijerama koje predstavljaju kočnicu organizacija u strateškom planiranju prelaska i implementiranja BIM tehnologije. Na temelju pregledane literature (tablica 2.) može se zaključiti kako su najčešće spomenute poteškoće i barijere implementacije BIM tehnologije visoki troškovi implementacije, što u pogledu potrebe i cijena usavršavanja korisnika nove tehnologije, a što u pogledu uvođenja nove tehnološke infrastrukture. Potom kao barijera dolaze otpor djelatnika (projektnog tima) radu s novim alatima te manjak specijalista. Činjenica je da BIM predstavlja i financijsko i vremensko optereće-

nje te samim tim početnim pretpostavkama, organizacije izbjegavaju, odnosno odgađaju samu implementaciju.

Tablica 2. Pregled literature - najčešće poteškoće/problemi implementacije BIM-a u organizacijama

	Nesigurnost u povrat investicije (RO)	Nekompatibilnost s proj. suradnicima	Neprimjerenost softvera radu koji se obavlja	Manjak specijaliziranih profesionalaca	Otpor proj. tima prema upotrebi novih alata (softvera)	Visoki troškovi usavršavanja	Visoki troškovi alata (softvera)	Nedostatak IT infrastrukture	Nedostatak podrške višeg menadžmenta	Nedostatak vremena za implementaciju	Potreba za promjenom kulture organizacije	Pravne nesigurnosti	Vlasništvo i intelektualno pravo	Ugovorni aranžmani	Odgovornost za rizik proizvoda
Alves de Souza et al. (2009)		+	+	+	+	+	+	+		+					
Eadie et al. (2014)		+		+	+	+	+		+		+	+	+	+	+
Lindblad i Vass (2015)														+	
Yan i Damian (2008)				+	+	+					+				
Coates et al. (2010)	+					+			+						
Azhar (2011)						+	+								
Crotty (2012)						+	+								
Lee et al. (2012)	+						+								
Arayici et al. (2009)	+			+	+				+						

## 2.2 BIM model razina zrelosti

Britanska vlada prepoznala je da će proces pomicanja građevinske industrije prema kompletno kolaborativnom radu biti progresivan s jasnim i prepoznatljivim ključnim događajima koji se u ovom procesu definiraju u obliku razina (eng. "Levels") [14]. Prema toj inicijativi razvijen je model BIM zrelosti, opisan na četiri razine s ciljem definiranja standarda i prepoznavanja potreba za ostvarenje pojedine razine. Sam model s četiri razine prikazan je na slici 1.

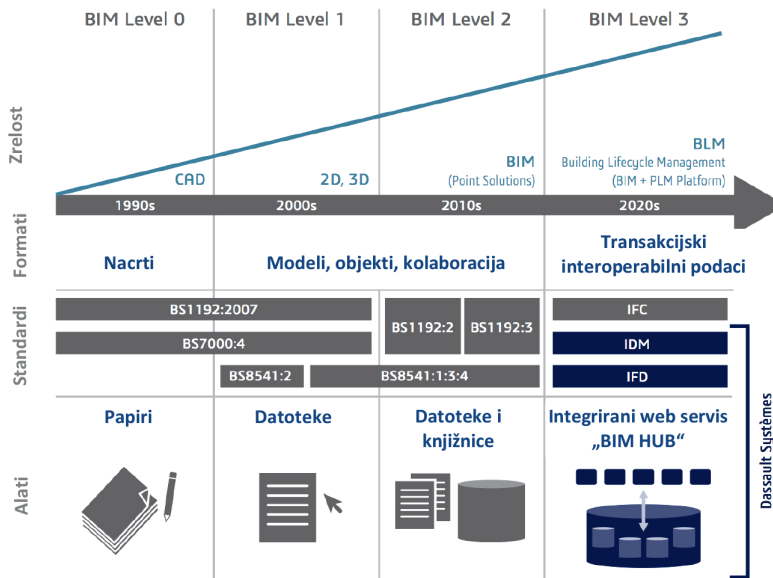


Nacionalni BIM standard definira pojedinu razinu na sljedeći način [14]:

**Level 0 BIM:** Predstavlja stari način rada pomoću kojeg su se proizvodi izrađivali u dvodimenzionalnom obliku, a komunikacija odvijala papirnatim ili elektronskim putem, odnosno kombinacijom oba načina.

**Level 1 BIM:** Predstavlja razinu koja je kombinacija 3D CAD-a za koncepciju rada i 2D za izradu tehničke dokumentacije tijekom procesa izdavanja dozvola. Komunikacija i dijeljenje podataka odvija se elektronskim putem u zajedničkog okruženja podataka (eng. *Common Data Environment*).

**Level 2 BIM:** Razina je na kojoj se osjeća BIM suradnja. Sve projektne strane rabe vlastite 3D modele i ne rade nužno na istom (jednom) zajedničkom modelu. Komunikacija i kolaboracija između disciplina odvija se putem zajedničkog formata datoteke što je ključan aspekt kolaboracije za ovu razinu. Bilo koja organizacija koja rabi ovakav format i način kolaboracije može kombinirati te podatke s vlastitima u cilju objedinjenja BIM modela te povodenja potrebnih provjera samog modela. Naglasak je na mogućnosti bilo kojeg računalnog programa da eksportira svoj proizvod u neki format datoteke koji je zajednički suradnicima na projektu. Takvi uvaženi formata su, primjerice, IFC (Industry Foundation Class) format ili COBie (Construction Operations Building Information Exchange).



The BIM Maturity Model by Mark Bew and Mervyn Richards adapted to reflect BLM's relationship to Level 3.

Slika 1. Model BIM zrelosti (Preuzeto i prevedeno od [18])

**Level 3 BIM:** Razina koja još uvijek nije implementirana u svijetu i na nju se trenutno gleda vizionarski. Ideja ove razine je da prezentira kompletnu kolaboraciju svih struka pomoću jednog zajedničkog modela projekta koji se nalazi na centralnom repozitoriju. Cilj ovog sustava je da sve strane mogu pristupiti i uređivati taj model, a kao prednost ističe se uklanjanje finalnog sloja rizika konflikta informacija. Također, ova razina poznata je i pod nazivom "Open BIM". Ono što je trenutno neistraženo s BIM tehnologijom i modelima jest kako riješiti autorska prava i obaveze, no ti isti problemi zapravo se rješavaju s ugovornim dokumentima i BIM planovima izvršenja, te softverskim alatima koji sadrže ograničenja u uređivanju, pisanju, odnosno pristupu podacima.

## 2.3 BIM standardi

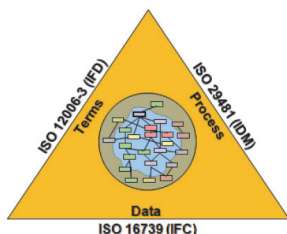
BIM standardi, kao i tradicionalni CAD standardi, rabe se kao podrška u stvaranju i dijeljenju BIM modela. Sami standardi omogućuju kontinuiranost projekta te vlasniku projekta produkt, model objekta, u željenom formatu. Standardi mogu utjecati na produktivnost i omogućiti održivost cjelokupne BIM implementacije na dvije razine: nacionalne i organizacijske/individualne. Dosljedni BIM standardi posebno su ključni za vladine agencije i odjele koji upravljaju većim brojem projekata s više interesnih strana, izvođača i krajnjih korisnika [15]. Istina je da neki projektni sudionici nisu dosljedni usvajanju i provođenju standarda (priča koja se ponavlja iz povijesti s CAD standardima) nego vlastitih pri čemu se, naravno, stvaraju komplikacije. Zemlje koje su implementirale BIM u svojoj regulativi, razvile su nacionalne BIM standarde koji pomažu u komunikaciji i koordinaciji na projektu. Neki od poznatijih i prihvaćenih BIM standarda su:

*National BIM Standard-United States (NBIMS-USTM) – Američki nacionalni BIM standard* [16]: Trenutno je aktualna treća verzija američkog BIM standarda koja na 3100 stranica teži standardizaciji usmjerenoj ka svim sudionicima na građevinskom projektu – od arhitekata, do izvođača, vlasnika objekta (upravitelja objekta) itd., s ciljem da izvuku što je više moguće iz BIM-a. Najnovije izdanje standarda usmjereno je olakšavanju učinkovitog upravljanja životnog ciklusa objekta, od faze planiranja i projektiranja do građevinskih radova [16].

*AEC (UK) BIM Standard – Britanski nacionalni standard* [17]: opisuje generalni pristup projektu neovisno o kojoj je tehnološkoj platformi riječ. Obuhvaća konvencije imenovanja (modela, BIM elemenata, disciplina i sl.), crtanje proizvoda u slučaju kad na projektu postoji kombinacija i BIM-a i CAD-a, te kada je na projektu 100 % implementiran BIM; standarde modeliranja (lokacija i koordinacija, faktor mjerila i sl.), postupak izmjene podataka i sl. Standard prate i dodatni dokumenti kao što su: AEC (UK) BIM Protocols – dokumenti specificirani za pojedinu BIM platformu, BIM plan izvršenja (eng. *BIM Execution plan*), matrice razina razvoja (eng. Level of Development) i mnogi drugi [17]. Referencira se na britanske norme i standarde povezane s upotrebom BIM tehnologije

i strateškim planom implementacije BIM Level 2 u javnim britanskim projektima (grafikon 1.). Neki od standarda koji čine sedam ključnih komponenata za BIM Level 2 su BS 1192:2007 (britanski standard koji definira procese razmjene projektnih informacija, uloge i odgovornosti, konvencije imenovanja, specifične projektne kodove, okolinu za razmjenu podataka (eng. *Common Data Environment*, CDE), PAS 1192-2:2013 (definira način prikupljana dokumentacije i modelskih informacija od faze projektiranja do izvođenja radova), PAS 1192-3:2014 (nastavno na PAS 1192-2:2013, fokusira se na fazu korištenja i održavanja objekta), BS 8541-2:2011 (standard koji daje smjernice i preporuke za simbolima i druge grafičke konvencije za uporabu na crtežima za građevinsku industriju, te je prvenstveno namijenjen onima koji pripremaju nacрте (slika 1.).

BuildingSMART definira grupu odgovarajućih standarda u okviru "Zlatnog trokuta" koja se sastoji od interoperabilnih modela (eng. *Data model standards* - IFC); definicije podataka (eng. *Data dictionary standards* - IFD), i procesa (eng. *Proces Definition Standards* - IDM) (slika 2.).



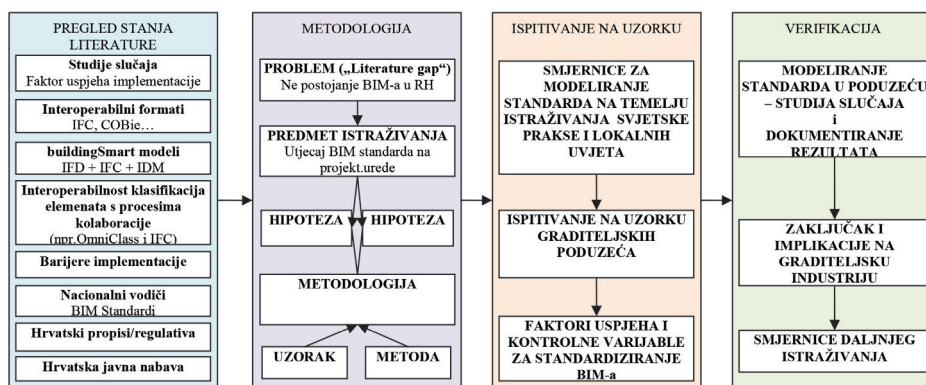
Slika 2. Building SMART model standarda [19]

Standardizacija i implementacija BIM tehnologije razvojni su procesi, ključni za ostvarivanje benefita svakog od interesnih sudionika na projektu. Bilo da je riječ o natječajnom procesu, koncipiranju projekta, fazi analiziranja, planiranja, izvođenja ili upravljanja i održavanja objekta, svaki od sudionika na projektu mora poznavati ključne aktivnosti rada u BIM tehnologiji kako bi osigurao nesmetan protok informacija, dosegao kvalitetnu kolaboraciju između sudionika i faza, te osigurao ostvarivanje predviđenih benefita radom u novoj tehnologiji. Implementacija BIM alata znatno je sporija u Centralnoj Europi u odnosu na skandinavske i anglosaksonske zemlje [20]. Kolarić, Pavlović i Vukomanović (2015) ističu kako se BIM na internacionalnoj razini široko primjenjuje, ali u Republici Hrvatskoj i Istočnoj Europi još uvijek nije popularan kao u većini razvijenih zemalja [21]. U Hrvatskoj trenutno nije zabilježeno postojanje nacionalnog BIM standarda, te je cilj ovog istraživačkog rada predstaviti metodologiju za izradu standarda za hrvatsko tržište.

### 3 Prijedlog istraživačkog okvira doktorskog rada

Kao dio istraživačkog rada doktorske disertacije proučava se implementacija standarda u inozemstvu, hrvatska praksa i regulativa u području projektiranja građevinskih objekata, međunarodne smjernice te smjernice hrvatske prakse s fokusom na projektne urede, te će se na temelju dobivenoga pregleda izraditi prijedlog standarda koji će se provjeriti na jednoj studiji slučaja. Obujam istraživačkog tijeka i izrade BIM standarda za hrvatskog tržišta prezentiran je na slici 3.

Nacionalni standard opsegom će sadržavati definicije BIM procesa i standarda rada na temelju dosadašnje prakse rada na hrvatskom tržištu u kombinaciji sa smjernicama internacionalnih najboljih praksi, te će definirati format i procedure komunikacije i kolaboracije između sudionika projekta kao i pregledne modele i ključne informacije za pojedince u projektu. Standard će biti integracija teorijskog i praktičnog, nacionalnog i internacionalnog znanja.



Slika 3. Prijedlog istraživačkog okvira doktorske disertacije

### 4 Zaključak

Implementacija BIM tehnologije definirana je s tri faktora: proizvodom, procesom i ljudima. Sama implementacija ne smije se gledati samo s točke "računalnog programa", nego kao socio-tehnološki aspekt. Kako bi implementacija BIM tehnologije bila uspješna, bitno je razmotriti i složenost BIM zahtjeva, korisnike, društvene aspekte, organizaciju samog poduzeća, informatičko-komunikacije tehnologije [22]. Složenost implementacije i njezina investicija nije samo fokusirana na uvođenje novog alata. Ona zahtijeva strateško i vizionarsko razmišljanje organizacije o smjeru u kojem kreće s novom tehnologijom, o barijerama koje će nadilaziti na tržištu te načinu na koji će pristupiti klijentima. Zahtijeva razumijevanje vanjskih i unutarnjih čimbenika koji utječu na samu organizaciju.

Tijekom implementacija ključno je da su organizacije svjesne početnih barijera pri usvajanju nove tehnologije – barijera poput potrebe za vremenskim i novčanim resursima nužnim za provođenje edukacija i tehnološke infrastrukture, vjerojatnosti otpora dijela zaposlenika novom sustavu i alatu rada, novog viđenja ugovaranja te zaštita autorskih prava modela i informacija koje izlaze kao produkt rada BIM-om.

Implementacija podrazumijeva organizacijske promjene na svi nivoima, edukaciju od vrhovnog menadžmenta pa sve do tehničke operative. Traži uvođenje standarda rada – kroz stvaranje i usvajanje vlastitih BIM standarda koji bi trebali biti (ako postoje) u skladu s nacionalnim standardima, uvođenja BIM plana izvršenja (“BIM Execution plan”), razumijevanje i korištenje unificiranih formata za komunikaciju i kolaboraciju između suradnika na projektu (IFC, COBie). U ovom radu prezentira se istraživački okvir u sklopu doktorske disertacije prema kojem će se razvijati prijedlog nacionalnog standarda kao produkta nastalog proučavanjem internacionalne prakse, standarda i smjernica te potreba na tržištu. Predloženi standard testirat će se na studiji slučaja, nakon čega će se validirati, prikupiti podatake i donijeti zaključak o doprinosima standarda. Važnost BIM standarda iznimno je velika, posebno zato što je BIM kao koncepcija premašio izvorni značaj svojeg imena. Od početnog značenja i usmjerenosti ka proizvodu – tj. građevini, BIM se danas prezentira kao pristup koji radikalno transformira i poboljšava cjelokupno poslovanje organizacije u svim sektorima vezanima za graditeljstvo [8].

## Literatura

- [1] Gallaher, M. et al.: Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry”, NIST GCR 04-867, 2004.
- [2] Suermann, R., Raja, R.A.: Evaluating industry perceptions of building information modeling (BIM) impact on construction, ITcon Vol. 14 (2009), pp. 574
- [3] National Building Information Modeling Standard, version 1 – Part 1 – Overview, Principles, and Methodologies, (2007.) Dostupno na: [https://www.wbdg.org/pdfs/NBIMSv1\\_p1.pdf](https://www.wbdg.org/pdfs/NBIMSv1_p1.pdf) (Pristupljeno: 5.5.2016.)
- [4] Tomek, A., Matejka, P.: The impact of BIM on risk management as an argument for its implementation in a construction company, Creative Construction Conference, Procedia Engineering, 85 (2014), pp. 501 – 509.
- [5] Eastman, et al.: BIM Handbook: A Guide to the Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors (2.ed.). John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [6] Kushwaha, V.: Contribution Of Building Information Modeling (BIM) To Solve Problems In Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry and Addressing Barriers to Implementation of BIM, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3 (2015) 1, pp. 100-105.

- [7] Epstein, E.: *Implementing Successful Building Information Modeling*, Norwood: Artech House, 2012.
- [8] Autodesk: A framework for implementing a BIM business transformation, Dostupno na: [https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&escr=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiTv--shqLLAhVFAA8KHAI-CYgQFggfMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.autodesk.com%2Fcontent%2Fdam%2Fautodesk%2Fwww%2Fsolutions%2Fbuilding-information-modeling%2Fget-started%2Fautodesk-project-transformer-whitepaper.pdf&usq=AFQJCNFmiobZga8uY\\_3G9bAb88YKBLHZgQ](https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&escr=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiTv--shqLLAhVFAA8KHAI-CYgQFggfMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.autodesk.com%2Fcontent%2Fdam%2Fautodesk%2Fwww%2Fsolutions%2Fbuilding-information-modeling%2Fget-started%2Fautodesk-project-transformer-whitepaper.pdf&usq=AFQJCNFmiobZga8uY_3G9bAb88YKBLHZgQ) . (Pristupljeno : 29.2.2016.)
- [9] Froese, T. M.: The impact of emerging information technology on project management for construction, *Automation in construction*, 19 (2010) 5, pp. 531-538
- [10] Watson, A.: BIM-a driver for change, 13th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Nottingham, UK., 2010.
- [11] Succar, B.: Building information modelling maturity matrix. *Handbook of research on building information modelling and construction informatics: Concepts and technologies*, J. Underwood and U. Isikdag, eds., IGI Publishing, pp. 65-103, 2010.
- [12] Lindbald, H., Vass, S.: BIM implementation and organizational change: A case study of a large Swedish public client, 8th Nordic Conference on Construction Economics and Organization, *Procedia Economics and Finance*, 21 ( 2015 ), pp. 178-184
- [13] Salleh, H., Wong, P. F. : Building Information Modelling application: focus group discussion, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 8, pp. 705-714
- [14] NBS (2014): BIM Levels Explained, web članak dostupan na: <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-levels-explained> (Pristupljeno: 9.7.2016.)
- [15] Beesley, C.: The Importance of BIM standards, Acronym online, 2014, web članak dostupan na: <http://acronymonline.org/importance-bim-standards/> (Pristupljeno: 7.7.2016.)
- [16] National BIM Standard - United States (2015), Dostupno na: <https://www.nationalbimstandard.org/>(Pristupljeno: 7.7.2016.)
- [17] AEC (UK) BIM Standard, verzija 1.0. (2009), Dostupno na: <https://aecuk.files.wordpress.com/2009/12/aecukbimstandard-v1-0.pdf> (Pristupljeno: 7.7.2016.)
- [18] Daassault Systems, (2014), „End-To-End Collaboration Enabled by BIM Level 3: An Architecture, Engineering & Construction Industry Solution Based on Manufacturing Best Practices.“ Dostupno na: <http://perspectives.3ds.com/architecture-engineering-construction/what-is-bim-level-3/> (Pristupljeno: 30.6.2016.)
- [19] BuildingSMART, dostupno na: <http://www.buildingsmart-tech.org/> (Pristupljeno: 29.07.2016.)
- [20] McGraw-Hill Construction, (2010), „The Business Value of BIM in Europe“, H.M. Bernstein Editor. Smart Market Report

- [21] Kolarić, D., Pavlović, D., Vukomanović, M.: Application of Building Information Modeling in Education, OTMC Conference 2015, pp. 384-397, 2015.
- [22] Tulenheimo, R.: Challenges of implementing new technologies in the world of BIM- Case study from construction engineering industry in Finland, 8<sup>th</sup> Nordic Conference on Construction Economics and Organization, Procedia Economics and Finance, 21 (2015), pp. 469 - 477

# **SAŽECI OBRANJENIH DISERTACIJA 2011. - 2015.**



NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
Mehaničko-empirijski model promjene širine tramvajskog kolosijeka tijekom eksploatacije dr.sc. Maja Ahac	193
Oblikovanje izvangradskih kružnih raskrižja na načelima geometrije kretanja vozila dr.sc. Saša Ahac	194
Kontrola kvalitete injektiranja štapnog sidra analizom dinamičkog odziva dr.sc. Mario Bačić	195
TIP-specifični indikatori hidroloških promjena za Dunavski sliv u Hrvatskoj dr.sc. Darko Barbalić	196
Doprinos razvoju održivog hibridnog mikroarmiranog betona primjenom produkata reciklaže otpadnih guma dr.sc. Ana Baričević	197
Optimizacija sastava cementom stabiliziranih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija sa zgurom dr.sc. Ivana Barišić	198
Svojstva predgotovljenih konstrukcijskih elemenata s djelomičnom zamjenom recikliranim čeličnim vlaknima dr.sc. Marko Bartolac	199
Robusnost nosivih sustava drvenih rešetkastih nosača dr.sc. Dean Čizmar	200
Nelinearna analiza oscilacija kabela i njihove interakcije s konstrukcijom dr.sc. Marija Demšić	201
Optimizacija sastava nevezanih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija s dodatkom recikliranog asfaltnog agregata dr.sc. Josipa Domitrović	202
Ocjena oštećenja plošnih konstrukcija primjenom dinamičkih parametara dr.sc. Ivan Duvnjak	203
Potresni proračun integralnih nadlučnih stupova lučnih mostova dr.sc. Marin Franetović	204
Ocjena stabilnosti postupaka za proračun oblika prednapetih mreža dr.sc. Petra Gidak	205
Kvantifikacija održivosti vodoopkrbnih sustava primjenom neizravne logike dr.sc. Ivan Halkijević	206
Karakterizacija samozbijajućih betona izloženih visokim temperaturama dr.sc. Marija Jelčić Rukavina	207
Predviđanje uporabnog vijeka armiranobetonskih mostova izloženih kloridima dr.sc. Marija Kušter Marić	208
Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izloženih umoru dr.sc. Ivan Lukačević	209
Sustav za podršku odlučivanju u upravljanju vrijednostima nekretnina dr.sc. Ivan Marović	210
Karakterizacija oštećenja armiranog betona primjenom metode infracrvene termografije dr.sc. Bojan Milovanović	211
Utjecaj kompetentnog upravljanja promjenama na uspješnost građevinskih projekata dr.sc. Maja-Marija Nahod	212
Pouzdanost priključaka pravokutnih šupljih profila izvedenih čelnim pločama i vijcima dr.sc. Josip Pišković	213
Primjena valične transformacije u analizi hidroloških vremenskih serija dr.sc. Kristina Potočki	214
Granični uvjeti primjene korozijski otpornih čelika kao armatura u betonu dr.sc. Marijana Serdar	215
Model vrednovanja organizacijske, tehnološke i institucionalne složenosti u građevinarstvu dr.sc. Josip Sertić	216
Organizacijski model ublažavanja rizika potresne uvredljivosti javnih zgrada dr.sc. Zvonko Sigmund	217
Modeliranje elastomernog materijala u numeričkoj analizi konstrukcijskih ležajeva dr.sc. Ana Skender	218
Teorijske postavke oblikovanja četverokrakih čvorišta u razini na načelima geometrije kretanja vozila dr.sc. Ivica Stančerić	219
Spojevi kompozitnih sustava drvo-nosivo staklo u potresnom okruženju dr.sc. Mislav Stepinac	220
Utjecaj prostorne promjenjivosti potresne pobude na odziv armiranobetonskih lučnih mostova dr.sc. Marta Šavor Novak	221
Metodologija održavanja u sustavu gospodarenja mostovima dr.sc. Danijel Tenžera	222
Utjecaj složenog izbočenja na poslijekritično ponašanje rešetkastih kupola dr.sc. Mario Uroš	223

## **dr.sc. Maja Ahac**

### **Životopis**

Rođena je 1981. godine u Zagrebu. Srednjoškolsko obrazovanje po programu prirodoslovno-matematičke gimnazije stekla je u Puli. Diplomirala je 2007. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na usmjerenju Prometnice. Iste godine zapošljava se kao asistentica – znanstvena novakinja na Katedri za željeznice matičnog fakulteta. Suradnica je na znanstvenoistraživačkim i stručnim projektima iz područja prometne buke i vibracija. Sudjeluje u nastavnom radu na predmetima vezanim uz projektiranje cesta te projektiranje, građenje i održavanje željeznica. Objavila je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovala na konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. **Stjepan Lakušić**

Datum obrane: 20. 12. 2013.

### **Naslov disertacije**

## **Mehaničko-empirijski model promjene širine tramvajskog kolosijeka tijekom eksploatacije**

### **Sažetak**

U radu je prikazana metodologija te rezultati izrade i primjene mehaničko-empirijskih modela promjene širine tramvajskih kolosijeka uslijed trošenja žljebastih tračnica tijekom eksploatacije. Istraživanje mogućnosti izrade modela i opravdanosti primjene mehaničko-empirijskog pristupa provedeno je duž 26 kilometra zagrebačkih tramvajskih kolosijeka. Na uzorku je izrađena povijesna baza geografski sinkroniziranih i segmentiranih podataka o iznosu promjene širine kolosijeka tijekom uporabe te o utjecajnim čimbenicima promjene - projektnim, konstrukcijskim i uporabnim karakteristikama kolosijeka. Sažimanje i filtriranje baze primjenom metoda deskriptivne statistike rezultiralo je identificiranjem 35 karakterističnih tipova tramvajskih kolosijeka. Regresijskom analizom odnosa sažetih vrijednosti promjene širine kolosijeka i intenziteta uporabe, izraženog u milijunima bruto tona, za svaki je tip definiran matematički model promjene širine. Te modele moguće je primijeniti pri planiranju održavanja, ali i pri projektiranju trase i odabiru konstrukcijskih elemenata tramvajskih kolosijeka. Znanstveni doprinos istraživanja ogleda se u razvoju računalne podrške za učinkovito objedinjavanje empirijskih podataka o širini tramvajskih kolosijeka te njegovih projektnih, konstrukcijskih i uporabnih karakteristika. Također, provedenim istraživanjima dobivene su nove spoznaje o učincima projektnih i konstrukcijskih elemenata te uporabnih karakteristika tramvajskih kolosijeka na promjenu njihove širine.

## **dr.sc. Saša Ahac**

### **Životopis**

Rođena je 1981. godine u Zagrebu. Srednjoškolsko obrazovanje po programu prirodoslovno-matematičke Gimnazije stekla je u Puli. Diplomirala je 2007. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na usmjerenju Prometnice. 2008. godine zapošljava se kao asistentica - znanstvena novakinja na Katedri za ceste matičnog fakulteta. Suradnica je na znanstveno-istraživačkim i stručnim projektima. U nastavi sudjeluje u pripremi i održavanju vježbi iz predmeta Ceste, Donji ustroj prometnica, Projektiranje cesta i Prometna buka. Objavila je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovala na konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. Vesna Dragčević

Datum obrane: 11. 4. 2014.

### **Naslov disertacije**

## **Oblikovanje izvangradskih kružnih raskrižja na načelima geometrije kretanja vozila**

### **Sažetak**

U radu je postavljena hipoteza da pristup projektiranju izvangradskih četverokrakih kružnih raskrižja, u kojem je geometrija kretanja mjerodavnog vozila polazište za oblikovanje elemenata raskrižja, rezultira optimalnim oblikovanjem u pogledu zauzetosti okolnog prostora, proвозnosti, preglednosti i brzine prolaska raskrižjem. Na osnovi iscrtanijh trajektorija kretanja mjerodavnih vozila na prethodno izrađenim shemama raskrižja provedeno je istraživanje oblikovanja elemenata i zakonitosti promjene njihova oblika u ovisnosti o prethodno definiranim uvjetima proвозnosti i brzine prolaska. Mjerodavna vozila birana su iz dvije kategorije (skup teretnih vozila i autobusi) prema kriteriju učestalosti pojedinog tipa vozila i najveće širine koju vozilo zauzima pri kretanju u zavoju (određene računalnom simulacijom kretanja vozila). Ispitivanje preglednosti provedeno je na trodimenzionalnim modelima raskrižja čiji su elementi definirani temeljem geometrije kretanja mjerodavnih vozila. Istraženi postupci poslužili su za izradu novog pristupa oblikovanju izvangradskih četverokrakih kružnih raskrižja. Definirana su mjerodavna vozila i elementi raskrižja ovisno o mjerodavnom vozilu, vanjskom polumjeru i kutovima sjecišta osi privoza za koje su zadovoljeni svi postavljeni uvjeti vezani na zakonitosti geometrije kretanja, brzine prolaska kroz raskrižje te preglednost. Ukazano je da pozitivni rezultati ovog istraživanja predstavljaju poticaj za praktičnu primjenu u projektantskoj praksi i da se mogu koristiti u izradi smjernica za projektiranje kružnih raskrižja.

## dr.sc. Mario Bačić

### Životopis

Mario Bačić diplomirao je 2010. godine kao najbolji student u generaciji na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Za vrijeme studiranja Fakultet ga je tri puta nagrađivao za postignuti uspjeh u prethodnoj godini. Od rujna 2010. je zaposlen na Zavodu za geotehniku, kao asistent - znanstveni novak. Od početka svog rada aktivno sudjeluje u provođenju vježbi na preddiplomskom i diplomskom studiju. Aktivno sudjeluje i na provedbi niza domaćih i međunarodnih znanstvenoistraživačkih projekata. U svom znanstveno istraživačkom radu, objavio je u koautorstvu 3 poglavlja u knjizi, 5 članaka u časopisima citiranim u CC i SCI bazama podataka, 9 radova na međunarodnim konferencijama te 5 pozvanih predavanja.

Mentor: Doc.dr.sc. Danijela Jurić Kačunić

Datum obrane: 23. 7. 2015.

### Naslov disertacije

## Kontrola kvalitete injektiranja štapnog sidra analizom dinamičkog odziva

### Sažetak

U radu se opisuje razvoj nove metode ispitivanja kvalitete injektiranja štapnih sidara koja se temelji na analizi njegovog dinamičkog odgovora uslijed umjetno generirane pobude. Analizira se mogućnost ocjene kvalitete injektiranja štapnih sidara koja predstavljaju jedan od najvažnijih elemenata ojačanja stijenske mase. Istodobno, razlomljene stijenske mase koje karakterizira prisutnost diskontinuiteta i šupljina različitih dimenzija, kao što su krške stijenske mase, prilikom geotehničkih zahvata najčešće se ojačavaju upravo injektiranim štapnim sidrima. Rizik gradnje u takvim terenima je visok ako se uzme u obzir negativan utjecaj diskontinuiteta i šupljina na kvalitetu injektiranja. Iz aspekta kontrole kvalitete štapnih sidara, na svjetskoj razini se još uvijek pretežno primjenjuje metoda čupanja sidara kojom se dobivaju podaci o nosivosti štapnog sidra, a nezadovoljavajuća kvaliteta injektiranja je tek jedan od mogućih uzroka reducirane nosivosti. U sklopu istraživanja izrađen je cjelovit informacijski sustav koji predstavlja središnji element predložene metode kojim se prikuplja, transformira i obrađuje signal. Predložena metodologija ispitivanja kvalitete injektiranja štapnih sidara verificirana je na velikom broju različitih kombinacija kvalitete injektiranja laboratorijskih modela štapnih sidara. Statističkom obradom prikupljenih podataka uspostavljena je veza između postotka injektiranosti i prve tri vlastite frekvencije, pri čemu su uspostavljene funkcije regresije s visokim koeficijentima korelacije. Kao osnovni ciljevi numeričkog modeliranja metodom konačnih elemenata definirani su usporedba s eksperimentalnim rezultatima te analiza utjecaja varijacije krutosti injekcijske smjese na dinamički odgovor.

## **dr.sc. Darko Barbalić**

### **Životopis**

Darko Barbalić rođen je 1971. godine u Sarajevu, Bosna i Hercegovina. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu završio je 1998. godine. Od 1999. godine radi u Hrvatskim vodama, Zavodu za vodno gospodarstvo gdje je trenutačno voditelj grupe za utvrđivanje značajki i procjenu poplavnih rizika. Sudjelovao je u izradi planova upravljanja vodnim područjima, uključujući i plan upravljanja rizicima od poplava, te nizu nacionalnih i međunarodnih vodnogospodarskih projekata. Član je Hrvatske komore inženjera građevinarstva i Hrvatskog hidrološkog društva te više bilateralnih i multilateralnih vodnogospodarskih stručnih skupina. Objavio je, kao autor ili koautor, više od četrdeset stručnih i znanstvenih radova u časopisima i zbornicima radova.

Mentor: Prof.dr.sc. Neven Kuspilić

Datum obrane: 19. 2. 2015.

### **Naslov disertacije**

## **TIP-specifični indikatori hidroloških promjena za Dunavski sliv u Hrvatskoj**

### **Sažetak**

Istraživanje se bazira na obradi karakteristika hidrološkog režima opisanih indikatorima hidroloških promjena te prostornih podataka potrebnih za karakterizaciju i svrstavanje vodotoka u ekotipove na slivu rijeke Dunav u Hrvatskoj. Analiza glavnih komponenti, klasteraska analiza i analiza varijacije/kovarijacije pokazale su da je opravdano korištenje ekoregija pri tipološkom razvrstavanju tekućica, što praktično implicitno potkrepljuje tvrdnje o utjecaju hidrološkog režima na ekosustave. Također, unutargodišnji raspored otjecanja vrlo je distinktna karakteristika područja te se može očekivati da je pridonijela formiranju tipova vodotoka. Za manje, neizučene, slivove indikatori hidroloških promjena opisani su regresijskim izrazima, i to većina s indikatorskom varijablom "ekoregija", a indikatori koji se odnose na malovodna razdoblja indikatorskom varijablom "litološki sastav". Rezultati ovog istraživanja dali su odgovor na više otvorenih pitanja o vezama hidrološkog režima i ekološkog sastava i stanja voda, te su u značajnoj mjeri opisali karakteristike hidrološkog režima bitne za vodne ekosustave na slivu rijeke Dunav u Hrvatskoj. Znanstveni doprinosi istraživanja su utvrđivanje hidroloških referentnih uvjeta vodotoka na lokacijama hidroloških stanica, definiranje tip-specifičnih vrijednosti indikatora hidroloških promjena te definiranje onih indikatora hidroloških promjena koji imaju potencijalno najveću ulogu u razlučivanju ekotipova.

## **dr.sc. Ana Baričević**

### **Životopis**

Ana Baričević rođena je 24. ožujka 1985. u Puli. Diplomirala je 22. rujna 2008. godine na smjeru Konstrukcije. Tijekom studija prima državnu stipendiju A kategorije za nadarene studente, te na posljednjoj godini studija stipendiju tvrtke Konstruktor d.d. U sklopu Erasmus K+ programa tijekom 2016. godine ide na osposobljavanje u Zavod za gradbeništvo Slovenije. Na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu radi od 2008. godine. Tijekom svog rada sudjeluje u pripremi projektne dokumentacije i provođenju većeg broja međunarodnih i nacionalnih projekata na temu gospodarenja građevnim i drugim otpadom te mogućnostima unapređenja sustava gospodarenja otpadom i njegove implementacije u građevnoj industriji. Objavila je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovala na konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. Dubravka Bjegović

Datum obrane: 14. 11. 2014.

### **Naslov disertacije**

## **Doprinos razvoju održivog hibridnog mikroarmiranog betona primjenom produkata reciklaže otpadnih guma**

### **Sažetak**

Gospodarenje otpadom predstavlja jedan od osnovnih izazova razvijenih zemalja. Suvremeni sustavi postupanja s otpadom prednost daju reciklaži i ponovnoj upotrebi više nego odlaganju. Poseban izazov predstavlja postupanje s otpadnim gumama. Iako se posljednjih godina znatno smanjila količina otpadnih guma koja se nekontrolirano odlaže u okoliš, njihovo odlaganje na deponijima također može biti uzrok ekološke katastrofe. Danas postoji niz pravilnika koji propisuju hijerarhiju postupanja s otpadnim gumama stavljajući ispred odlaganja uporabu i reciklažu, bilo u materijalne i/ili energetske svrhe. U sklopu rada razvijena je nova vrsta materijala - ekološki i ekonomski održivi hibridni mikroarmirani beton dobiven kombinacijom tradicionalnih komponenti i proizvoda reciklaže otpadnih guma (recikliranih čeličnih vlakana i gume). Istodobnom primjenom razornih i nerazornih ispitivanja provedena je opsežna karakterizacija novog materijala uz unapređenje postojećih metoda za ocjenu ponašanja tijekom savojnog opterećenja. Predložen je model za predviđanje nosivosti i definiranje odnosa progib - širina pukotine, gdje se razvijenim modelima omogućava lakše projektiranje i odabir novih materijala ovisno o budućoj namjeni. Dodatno je razvijena metodologija optičke analize ravnine sloma za točnije i brže određivanje broja vlakana, kuta orijentacije i faktora segregacije. Provedeno je unapređenje metodologije određivanja oblika sloma i lokalizacije oštećenja primjenom akustične emisije za hibridne mikroarmirane kompozite. Provedenim analizama potvrđene su hipoteze rada da se optimalnom količinom i omjerom dviju vrsta vlakana, industrijskih i recikliranih metalnih vlakana, može pripremiti održivi hibridni mikroarmirani beton zahtijevanih svojstava, a uz značajne ekonomske i ekološke uštede zbog smanjenog udjela industrijskih metalnih vlakana.

## **dr.sc. Ivana Barišić**

### **Životopis**

Rođena je 18. travnja 1983. godine u Sremskoj Mitrovici, Srbija. Diplomirala je 2007. godine na sveučilišnom dodiplomskom studiju Građevinskog fakulteta Osijek, Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku. Tijekom 2012. sudjeluje na ljetnoj školi 2<sup>nd</sup> international summer school in Wiesbaden: Solutions for the urban traffic infrastructure, Wiesbaden, Njemačka, a 2013. boravi na Građevinskom fakultetu u Mariboru, Slovenija u sklopu ERASMUS programa mobilnosti nastavnog osoblja. Trenutačno je zaposlena na radnom mjestu docenta na Građevinskom fakultetu Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku. Područje znanstvenoistraživačkog rada su kolničke konstrukcije i primjena otpadnih materijala u cestogradnji.

Mentor: Prof.dr.sc. Tatjana Rukavina

Datum obrane: 21. 12. 2012.

### **Naslov disertacije**

## **Optimizacija sastava cementom stabiliziranih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija sa zgurom**

### **Sažetak**

U radu je dan pregled mogućnosti primjene različitih alternativnih materijala u cestogradnji te su prikazana neka od dosadašnjih istraživanja karakteristika slojeva kolnika uz primjenu građevnog otpada i otpada od rušenja, automobilskih guma, stakla i letećeg pepela. Posebno je prikazana zgura kao otpadni materijal kroz opis procesa proizvodnje i osnovnih svojstava kao građevnog materijala. Provedenim istraživanjem obuhvaćen je čitav niz ispitivanja kojima je cilj bio utvrditi mogućnost primjene čeličanske zgre kao agregata u cementom stabiliziranim nosivim slojevima kolničkih konstrukcija u kombinaciji s prirodnim agregatom (dravskim šljunkom). Stoga su određena svojstva čvrstoće (tlačna i indirektna vlačna čvrstoća), elastična svojstva (dinamički modul elastičnosti), gustoća te otpornost na djelovanje mraza. Pri analizi svojstava stabilizacijskih mješavina primijenjene su i metode mjerenja brzine ultrazvuka i rezonantne frekvencije kao jedne od standardnih, nerazornih metoda karakterizacije kvalitete betona koje još uvijek nemaju široku primjenu u domaćoj cestogradnji. Radi definiranja optimalnog sastava cementnih stabilizacija u smislu smanjenja količine prirodnog agregata i veziva, u sastavu mješavina varirana je količina zgre (0%, 25%, 50%, 75% i 100% u odnosu na količinu prirodnog šljunka) te količina cementa kao veziva (2%, 4% i 6% u odnosu na ukupnu masu agregata). Uzorci su njegovani 7, 28, 90 i 180 dana kako bi se utvrdio utjecaj duljine njege na svojstva kao i razvoj čvrstoće tijekom vremena. Rezultati provedenih ispitivanja i njihova analiza pokazali su kako je moguća primjena zgre u cementnim stabilizacijama čime se ostvaruje ušteda prirodnog agregata. Utvrđene su i značajne korelacije brzine ultrazvuka s čvrstoćama te da je moguća procjena čvrstoće materijala temeljem brzine ultrazvuka.

## dr.sc. Marko Bartolac

### Životopis

Marko Bartolac rođen je 10. siječnja 1986. u Karlovcu. Na sveučilišnom dodiplomskom studiju građevinarstva Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (smjer Konstrukcije) diplomirao je 2009. godine. Fakultet ga je nagradio za postignuti uspjeh tijekom akademske godine 2007./2008. Sveučilišni poslijediplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (smjer Mehanika konstrukcija) završio je obranom doktorskog rada 2015. godine. Tijekom izrade doktorskog rada boravio je na znanstvenom usavršavanju na Sveučilištu u Sheffieldu (Engleska). Od srpnja 2015. godine zaposlen je kao poslijedoktorand na Zavodu za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Područje znanstvenoistraživačkog rada Marka Bartolca obuhvaća ispitivanje materijala i konstrukcija, proboj armiranobetonskih ploča i mikroarmirani beton.

Mentor: Prof.dr.sc. Joško Krolo

Datum obrane: 16. 7. 2015.

### Naslov disertacije

## Svojstva predgotovljenih konstrukcijskih elemenata s djelomičnom zamjenom recikliranim čeličnim vlaknima

### Sažetak

Otpadne auto gume predstavljaju ozbiljan ekološki problem koji neizbježnim i ubrzanim povećanjem broja vozila u cijelom svijetu postaje sve izraženiji. Procesom dezintegracije guma dobiva se nekoliko proizvoda koji imaju potencijala za primjenu u građevinarstvu: guma, čelična vlakna i polimerna vlakna. U sklopu doktorskog rada proučavana je mogućnost upotrebe čeličnih vlakana kao armature u betonskim elementima izloženim posmičnim naprezanjima. Konstrukcijski sustav ploče oslonjene na stupove ima u praksi dosta raširenu primjenu. Iako naizgled jednostavan, takav sustav u pojedinim slučajevima krije velik izazov za projektante s obzirom na niski deformacijski kapacitet i krhko ponašanje u slučaju sloma probojem stupa kroz ploču. Probijem jednog stupa kroz ploču, ova pojava se vrlo lako može proširiti na susjedne stupove i domino-efektom dovesti do gubitka nosivosti cijele konstrukcije. Kako bi se povećala otpornost ploče na slom probijem, a naročito deformacijski kapacitet spoja stupa i ploče, intenzivno se istražuju i razvijaju različite metode u svrhu poboljšanja tih parametara u ovoj kritičnoj zoni. Jedna od tih metoda je i korištenje betona armiranog čeličnim vlaknima. U ovom radu je istražena mogućnost primjene betona armiranog kombinacijom recikliranih čeličnih vlakana iz otpadnih automobilskih guma i industrijskih čeličnih vlakana. Glavna ideja o poboljšanju probojne čvrstoće i deformacijskog kapaciteta ploče od mikroarmiranog betona popraćena je idejom o sposobnosti recikliranih čeličnih vlakana da svojim učinkom predstave ekološki i ekonomski prihvatljivu alternativu konvencionalnim sustavima armiranja protiv proboja. U sklopu izrade rada provedeno je opsežno eksperimentalno istraživanje na ukupno dvadeset sedam ploča. Na temelju rezultata ispitivanja provedena je provjera dostupnih analitičkih modela za proračun proboja ploča i ocijenjena njihova primjenjivost na proboj ploča armiranih kombinacijom industrijskih i recikliranih čeličnih vlakana.



## dr.sc. Dean Čizmar

### Životopis

Rođen je u Zagrebu 5. listopada 1979. Diplomirao na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2003. Dobitnik je Dekanove nagrade 2003. Od 2006. do 2012. zaposlen je na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Tijekom izrade disertacije sudjeluje na nizu znanstvenih projekata Europske unije kao npr: COST E55 *Modelling of the performance of timber structures*, COST TU601 *Robustness of structures* te FP1001 *Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures*. Trenutačno radi na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. U koautorstvu je objavio dva sveučilišna udžbenika, dva rada indeksirana u Curent Contents, šest radova u SCI-E te više od 25 radova na međunarodnim skupovima. Interesi obuhvaćaju drvene konstrukcije, održivu gradnju, energetske učinkovitost, pouzdanost i robusnost konstrukcija.

Mentor: Prof.dr.sc. Vlatka Rajčić

Datum obrane: 20. 11. 2012.

### Naslov disertacije

## Robusnost nosivih sustava drvenih rešetkastih nosača

### Sažetak

U radu su predstavljene predložene mjere robusnosti (faktor robusnosti za normiranu vjerojatnost otkazivanja i indeks robusnosti za normiranu pouzdanost). Predložena metodologija nije ovisna o vrsti materijala niti o statičkom sustavu. Kako navedene mjere ovise o vjerojatnosti otkazivanja odnosno o pouzdanosti konstrukcijskog sustava, predložena je metodologija procjene pouzdanosti kompleksnog konstrukcijskog sustava koja je relativno jednostavna. Napravljeni su krti modeli, te su analizirani različiti nosivi sustavi rešetkastih nosača čije su dimenzije određene semiprobabilističkim postupkom. Prvi dio eksperimentalnih ispitivanja obuhvatio je analizu ponašanja nosača dimenzija koje odgovaraju dimenzijama gornjeg pojasa rešetkastih nosača u inženjerskoj praksi te mehaničkih karakteristika osnovnog materijala. Na osnovi provedenih laboratorijskih ispitivanja izvedeni su zaključci vezano uz postojeće probabilističke parametre mehaničkih karakteristika lameliranog drva. Također, na osnovi tih ispitivanja izveden je zaključak vezan uz ponašanje drva pri savijanju te tlaku paralelno s vlakancima. Uzimajući u obzir duktilnost u tlaku te stvarne probabilističke parametre mehaničkih karakteristika, napravljena je procjena robusnosti razmatranih rešetkastih nosača koja je uspoređena s krtim modelom. Drugi dio eksperimentalnih ispitivanja obuhvatio je analizu ponašanja spojnih sredstava i to vijčanih spojeva te čeličnih nazubljenih ploča. U zadnjem dijelu eksperimentalnih ispitivanja napravljeno je ispitivanje drvenih rešetkastih nosača čije dimenzije veličinom odgovaraju nosačima u inženjerskoj praksi. Globalno ponašanje ovih rešetkastih nosača je modelirano pomoću štapnih modela te opruga koje simuliraju ponašanje spojnih sredstava. Usporedba numeričkog modela i provedenih eksperimentalnih ispitivanja pokazuje relativno dobru točnost predloženog modela.

## dr.sc. Marija Demšić

### Životopis

Rođena je 1985. u Slavonskom Brodu. Diplomirala je 2009. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. U akademskoj je godini 2006/2007. dobila Dekanovu nagradu. Tijekom studiranja, od 2008. do 2009., radi u Institutu građevinarstva Hrvatske. U rujnu 2009. zaposlila se na matičnom fakultetu u Zavodu za tehničku mehaniku na Katedri za statiku, dinamiku i stabilnost konstrukcija, gdje radi i danas. Doktorski rad obranila je u prosincu 2015. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. U znanstvenom se području tehničke mehanike bavi analitičkim i numeričkim postupcima linearnog i nelinearnog proračuna na diskretnim i kontinuiranim modelima, seizmičkim proračunom konstrukcija i programiranjem numeričkih metoda proračuna. Objavila je više znanstvenih radova te je sudjelovala na konferencijama u zemlji i inozemstvu. Članica je organizacija Central European Association for Computational Mechanics, Hrvatskog društva za mehaniku te Hrvatske udruge diplomiranih inženjera Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu AMCA-FA.

Mentor: Doc.dr.sc. Verica Raduka

Datum obrane: 17. 12. 2015.

### Naslov disertacije

## Nelinearna analiza oscilacija kabela i njihove interakcije s konstrukcijom

### Sažetak

U radu je analizirana interakcija prisilnih i parametarskih oscilacija kabela koje nastaju uslijed gibanja oslonca. Za oblikovanje modela kabela korišteni su analitički i numerički postupci. Kontinuirana diferencijalna jednadžba gibanja kabela reducirana je na konačan broj stupnjeva slobode primjenom Galerkinove metode. Metodom višestrukih skala određene su jednadžbe frekvencijsko amplitudnih krivulja i krivulje koje određuju rezonancijska područja u analitičkom obliku te je provedena lokalna analiza stabilnosti gibanja. Rješenja su provjerena direktnom numeričkom integracijom te modeliranjem kabela konačnim diferencijama i konačnim elementima. Analiza interakcije kabela s konstrukcijom provedena je na modelu grede ovješene na kabel. Za sustav je izvedena frekvencijska jednadžba te je određen spektar frekvencija. Reducirani je sustav oblikovan Galerkinovim postupkom uz primjenu kontinuiranih funkcija vlastitih oblika oscilacija. Područje autoparametarskih oscilacija kabela određeno je zadavanjem numeričkoga uvjeta za rezonanciju. Rješenja su provjerena modeliranjem sustava konačnim elementima. Znanstveni se doprinos rada očituje u izvodu analitičkih izraza za rezonancijska područja i veličinu amplitude oscilacija paraboličnih kabela vrlo malenoga omjera strelice i raspona. Analiza dinamičkoga odziva ovješena sustava pokazala je da se osnovno područje parametarskih oscilacija kabela proširuje na područje viših frekvencija ako su istovremeno pobuđene prisilne oscilacije drugih oblika sustava.

## **dr.sc. Josipa Domitrović**

### **Životopis**

Rođena u Ogulinu 1984. godine. Diplomirala je 2009. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Iste godine zapošljava se kao asistentica – znanstvena novakinja na Katedri za ceste matičnog fakulteta. Sudjeluje u izradi stručnih projekata dimenzioniranja i ocjene stanja kolničkih konstrukcija, te projektima koji se odvijaju u okviru Laboratorija za ekologiju, Zavoda za prometnice, gdje radi na provođenju kontrole kvalitete geosintetskih materijala. Aktivno je uključena u nastavnom radu na predmetima vezanim uz projektiranje cesta te projektiranje i održavanje kolničkih konstrukcija. U svom znanstvenoistraživačkom radu bavi se problematikom vezanom uz modeliranje ponašanja kolničkih konstrukcija, primjenu alternativnih materijala u cestogradnji te primjenu nerazornih metoda ispitivanja kolničkih konstrukcija. Objavila je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovala na konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. Tatjana Rukavina

Datum obrane: 17. 7. 2015.

### **Naslov disertacije**

## **Optimizacija sastava nevezanih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija s dodatkom recikliranog asfaltnog agregata**

### **Sažetak**

Koncept održivog razvoja u cestogradnji podrazumijeva očuvanje neobnovljivih izvorišta prirodnih agregata te smanjenje količina i ponovnu upotrebu otpadnih materijala. Jedna od najčešćih primjena nekog otpadnog materijala u cestogradnji jest primjena recikliranog asfaltnog agregata za izradu asfaltnih mješavina. Međutim, s obzirom na gornje granice dopuštenog udjela recikliranog asfaltnog agregata, kao i druge uvjete koji se postavljaju na asfaltnu mješavinu i od njih izvedene slojeve, još uvijek postoje znatne količine recikliranog asfaltnog agregata koje se ne mogu iskoristiti na ovaj način. Kako bi se riješio taj problem, u radu su istražene mogućnosti primjene mješavina recikliranog asfaltnog i prirodnog agregata u nevezanim nosivim slojevima kolničke konstrukcije. Mješavine prirodnog i recikliranog asfaltnog agregata su projektirane s obzirom na zahtjeve koji se postavljaju na granulometrijski sastav i geometrijske karakteristike materijala za izradu nevezanih nosivih slojeva. Ukupno je projektirano osam mješavina u kojima je variran tip prirodnog te udio recikliranog asfaltnog agregata (0, 20, 35 i 50 %). Na mješavinama su provedena ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava, optimalnog udjela vlage i maksimalne suhe prostorne mase, nosivosti, rezilientnih modula i trajnih osnih deformacija. Ispitivanja nosivosti, rezilientnih modula i trajnih osnih deformacija su osim na standardnim uzorcima provedena i na uzorcima koji su bili izloženi određenom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Znanstveni doprinos istraživanja ogleda se u optimizaciji sastava mješavina prirodnog i recikliranog asfaltnog agregata s obzirom na sadašnju tehničku regulativu. Provedenim istraživanjima dobivene su nove spoznaje o ponašanju mješavina prirodnog i recikliranog asfaltnog agregata, te je utvrđen utjecaj udjela recikliranog asfaltnog agregata na fizikalno-mehanička svojstva mješavina.

## dr.sc. Ivan Duvnjak

### Životopis

Rodio se 12. svibnja 1984. u Sinju. Diplomirao je 2008. na Sveučilištu u Zagrebu, na Građevinski fakultet, nakon čega se zapošljava na Zavodu za tehničku mehaniku istog fakulteta na radnom mjestu stručnog suradnika, a potom u lipnju 2009. zapošljava se na radno mjesto znanstvenog novaka. U travnju 2015. obranio je disertaciju. Od 2008. do danas sudjelovao je na nekoliko znanstveno-istraživačkih projekata. U svom znanstvenom radu bavi se monitoringom građevinskih konstrukcija, nedestruktivnim ispitivanjima, određivanjem oštećenja na konstrukcijama primjenom dinamičkih parametara, statičkim i dinamičkim ispitivanjima konstrukcija, laboratorijskim i terenskim ispitivanjima. Održava nastavu na preddiplomskom studiju građevinarstva iz predmeta Otpornost materijala, na diplomskom studiju iz predmeta Teorija elastičnosti i plastičnosti, Mehanika materijala i Eksperimentalne metode. Do sada je kao autor i koautor objavio više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovao na konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. Mladenko Rak

Datum obrane: 17. 4. 2015.

### Naslov disertacije

## Ocjena oštećenja plošnih konstrukcija primjenom dinamičkih parametara

### Sažetak

Ocjena oštećenja na konstrukcijama obuhvaća određivanje lokacije i razine oštećenja iz promjene dinamičkih parametara (vlastitih frekvencija, koeficijenta prigušenja i modalnih oblika) određenih na neoštećenoj i oštećenoj konstrukciji. U okviru istraživanja razvijena je nova metoda za određivanje lokacije i relativne razine oštećenja na plošnim konstrukcijama. Nova metoda nazvana indeks oštećenja (DI - Damage Index) temelji se na usporedbi normaliziranih vektora modalnih oblika prije i nakon oštećenja konstrukcije. Metoda je višestruko testirana različitim simulacijama oštećenja primjenom numeričkih i eksperimentalnih plošnih modela. Opsežna eksperimentalna istraživanja provedena su u kontroliranim laboratorijskim uvjetima na armiranobetonskim pločama na kojima su simulirana različita diskretna i kontinuirana oštećenja. Uz eksperimentalno istraživanje provedene su i detaljne numeričke analize za identična oštećenja i rubne uvjete kao kod eksperimentalnih modela, te numeričke simulacije za veći broj rubnih uvjeta i oštećenja koja su teško izvediva u laboratorijskim uvjetima. Na temelju provedenih istraživanja može se zaključiti da nova metoda omogućuje utvrditi postojanje jednog ili više oštećenja i odrediti njihove lokacije neovisno o rubnim uvjetima. Nadalje, pokazano je da metoda indeksa oštećenja omogućuje odrediti relativnu razinu oštećenja. Pokazano je da aritmetička sredina vlastitih frekvencija kao i aritmetička sredina koeficijenta prigušenja za ukupan broj razmatranih modalnih oblika opisuju globalnu promjenu krutosti pločaste konstrukcije.

## **dr.sc. Marin Franetović**

### **Životopis**

Marin Franetović je rođen 7. listopada 1981. godine u Dubrovniku, gdje je završio osnovnu školu, osnovnu glazbenu školu i opću gimnaziju. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisuje 2000. godine. Diplomski rad obranio je 2006. godine s ocjenom izvrstan. Poslijediplomski znanstveni studij za stjecanje akademskog stupnja doktora znanosti upisao je 2007. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Doktorsku disertaciju obranio je 20. prosinca 2013. Dobitnik je nagrade za najbolji doktorski rad u području konstrukcija za disertaciju Potresni proračun integralnih nadlučnih stupova lučnih mostova, Hrvatski savez građevinskih inženjera (HSGI), studeni 2014. Autor je i koautor dvadesetak stručnih i znanstvenih radova, s kojima je sudjelovao i prezentirao ih na svjetskim i europskim kongresima iz područja građevinarstva.

Mentor: Prof.dr.sc. **Jure Radić**

Datum obrane: 20. 12. 2013.

### **Naslov disertacije**

## **Potresni proračun integralnih nadlučnih stupova lučnih mostova**

### **Sažetak**

Nadlučni stupovi lučnih mostova moraju prilikom potresa ispuniti značajne zahtjeve u pogledu duktilnosti. Stoga je prijeko potrebna detaljnija analiza njihova seizmičkog odziva i u konačnici pravilno oblikovanje koje će pružiti njihov željeni odziv. U doktorskom radu je istražena mogućnost primjenjivosti izravnog potresnog proračuna zasnovanog na pomacima (IPPZP procedura) na integralne nadlučne stupove, koji su jedine komponente kod lučnih armiranobetonskih mostova za koje je preporučljiv neelastičan odziv prilikom potresa. U radu je predložena izvorna procedura IPPZP integralnih nadlučnih stupova armiranobetonskih lučnih mostova koja se sastoji od sljedećih koraka: početnih pretpostavki, definiranja proračunskog deformacijskog pomaka, analize popustljivosti, izravnog potresnog proračuna zasnovanoga na pomacima nadlučnih stupova i efektivne modalne analize čitavog lučnog mosta. Predložena procedura proračuna je također unaprijeđena iznalaženjem novih polinoma koji opisuju profil pomaka mosta u poprečnom smjeru pri neelastičnom odzivu i raspisanim izrazom za izračun vrijednosti jednakovrijednog viskozno prigušenja integralnih armiranobetonskih lučnih mostova. Predložena procedura je verificirana i na postojećim lučnim mostovima, a rezultati su uspoređeni s onima dobivenima iz nelinearnog proračuna uz upotrebu vremenskih zapisa. Dokazana je primjenjivost predložene procedure na integralne nadlučne stupove kao i to da se primjenom te procedure postižu povoljne i održive konstrukcije u pogledu potresnog odziva.

## dr.sc. Petra Gidak

### Životopis

Petra Gidak rođena je u Karlovcu 14. veljače 1980. Godine 1998. maturirala je s odličnim uspjehom u Gimnaziji Karlovac. Na Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisala se 1998. godine. U akademskoj je godini 2000./2001. osvojila Dekanovu nagradu za rad Numerička analiza sferičnog spremnika metodom konačnih elemenata, a nagrađena je rektorovom nagradom za *Proširenje programa DIM*. Nakon diplome zaposlila se u projektnom birou Matim d.o.o. u Karlovcu, u kojem je radila naredne četiri godine. Godine 2003. upisala je poslijediplomski studij za magistra na Građevinskom fakultetu u Zagrebu iz usmjerenja Inženjerske konstrukcije. Kao znanstveni novak zaposlila se na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2007. godine. U svibnju 2015. godine izabrana je u znanstveno zvanje znanstveni suradnik, a trenutno radi kao poslijedoktorant na Zavodu za tehničku mehaniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje istražuje numeričke metode za traženje oblika prednapetih vlačnih konstrukcija te njihovu primjenu na oblikovanje tlačnih konstrukcija.

Mentor: Prof.dr.sc. Damir Lazarević

Datum obrane: 3. 10. 2014.

### Naslov disertacije

## Ocjena stabilnosti postupaka za proračun oblika prednapetih mreža

### Sažetak

U radu je analizirana konvergencija nekih popularnih iteracijskih postupaka, točnije metode Newton-Raphsona, modificirane metode Newton-Raphsona, uzastopne relaksacije metode Newton-Raphson i modificirane metode Newton-Raphsona. Nelinearan sustav jednadžbi koji se pritom rješava predstavlja jednadžbe ravnoteže mreže prednapetih kabela. Konvergencija navedenih metoda izrazito ovisi o izboru početne aproksimacije koja mora ležati unutar unaprijed nepoznatog područja konvergencije. I kod drugih iteracijskih algoritama postoje slični problemi s konvergencijom. Odabrana su tri primjera mreže prednapetih kabela koji se razlikuju po broju stupnjeva slobode, odnosno veličini nelinearnog sustava jednadžbi. Prvi primjer sadrži jedan slobodan čvor, odnosno radi se o slučaju s tri stupnja slobode dok preostala dva primjera imaju šest i dvanaest stupnjeva slobode. Za dobivanje područja konvergencije navedenih metoda napravljen je vlastiti programski kod kojim se ispituje svaka točka unutar odabranog područja s obzirom na konvergenciju iteracijskog postupka. Znanstveni doprinos rada očituje se u objašnjenju ponašanja odabranih metoda proračuna oblika prednapetih mreža kabela s obzirom na postupke rješavanja, stabilnost i brzinu konvergencije. U radu je vrednovan oblik postojećeg tlačnog svoda u atriju Kneževa dvora u Dubrovniku. Korištenjem vlačno - tlačne analogije, odnosno modelirajući tlačni svod vlačnom membranom dobiven je stabilan oblik svoda. Razlika u geometriji između modela i prototipa svoda predstavlja momentni dijagram na tlačnom svodu.

## **dr.sc. Ivan Halkijević**

### **Životopis**

Ivan Halkijević rođen je 9. travnja 1982. u Slavonskom Brodu, gdje je stekao srednjoškolsko obrazovanje. Diplomirao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2008. godine, na hidrotehničkom usmjerenju. Dobitnik je rektorove nagrade za akademsku godinu 2005. / 2006. U razdoblju od listopada 2008. godine do srpnja 2009. radi kao stručni suradnik na Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, a od srpnja 2009. do danas zaposlen je kao asistent na istom zavodu, gdje radi na znanstvenim, nastavnim i stručnim poslovima. U koautorstvu je do sada objavio 26 znanstvenih radova od čega 5 u stranim časopisima, 3 u domaćim časopisima, 8 u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom te 10 u zbornicima skupova s domaćom recenzijom.

Mentor: Prof.dr.sc. **Živko Vuković**

Datum obrane: 30. 5. 2014.

### **Naslov disertacije**

## **Kvantifikacija održivosti vodoopskrbnih sustava primjenom neizrazite logike**

### **Sažetak**

Disertacija se bavi problematikom kvantitativne ocjene održivosti vodoopskrbnih sustava. U radu su prikazane teoretske postavke kao i uvjeti pod kojima se koncept održivosti sukcesivno razvijao u domeni vodnoga gospodarstva. Objašnjene su najčešće primijenjene metode ocjene održivosti pomoću dimenzijskih pokazatelja te se daje pregled metode neizrazite logike. Predlaže se precizna definicija održivog vodoopskrbnog sustava, kao i definicija koncepta kvazi jake održivosti. Koristi se Mamdanijev i Sugenov postupak neizrazitog zaključivanja. Definira se 35 dimenzijskih pokazatelja. Predlaže se metoda unaprjeđenja postupka definiranja neizrazitih pravila Mamdanijevog postupka te se analizira mogućnost primjene umjetne neuronske mreže u postupku definiranja neizrazitih pravila Sugenovog postupka. U konačnici se izrađuje neuro neizraziti model kojim se kvantificira održivost 17 vodoopskrbnih sustava u Hrvatskoj. Izvorni doprinos ovog rada sadržan je u proračunskom okviru kojim se pomoću metode neizrazite logike kvantificira stupanj održivosti vodoopskrbnih sustava. Predložene su izvorne definicije pojedinih dimenzijskih pokazatelja. Dana je izvorna, precizna definicija održivog vodoopskrbnog sustava. Predložen je i izvorni koncept kvazijake održivosti kojim se postavljaju restriktivni kvantifikacijski kriteriji, te je izvršena nadogradnja Mamdanijevog postupka neizrazitog zaključivanja metodom kojom se definiranje neizrazitih pravila, a time i sama implikacija, temelji na mjeri udaljenosti između dva neizrazita skupa.

## dr.sc. Marija Jelčić Rukavina

### Životopis

Marija Jelčić Rukavina rođena je 30. kolovoza 1978. u Čapljini, Bosna i Hercegovina. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu završila je 2004. godine na smjeru Materijali. Od 2004. do 2006. godine je zaposlena u Institutu građevinarstva Hrvatske u Zavodu za zgradarstvo. Od 2006. do 2014. godine je zaposlena na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu kao znanstveni novak – asistent. Doktorski studij Materijali u građevinarstvu je upisala u akademskoj godini 2006/2007. Tijekom doktorskog studija dobila je stipendiju za doktorande od Hrvatske zaklade za znanost te provela tri mjeseca na Institutu za konstrukcijske materijale na Sveučilištu Stuttgart. Trenutačno je zaposlena na Zavodu za materijale, Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u statusu poslijedoktoranta. Područja njenog znanstveno-istraživačkog rada uključuju nove održive tehnologije betona, posebno samozbijajućih betona, istraživanje novih materijala i tehnologija u području zaštite od požara građevina, razorne i nerazorne metode ispitivanja građevinskih materijala.

Mentor: Prof.dr.sc. Dubravka Bjegović

Datum obrane: 17. 7. 2014.

### Naslov disertacije

## Karakterizacija samozbijajućih betona izloženih visokim temperaturama

### Sažetak

S obzirom na bolja specifična svojstva u odnosu na uobičajeni beton, samozbijajući je beton, kao posebna vrsta betona visokih uporabnih svojstava, danas sve više u uporabi. Zahtijevana svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju se postižu dodavanjem određenog udjela sitnih čestica u vidu različitih mineralnih dodataka koji potom utječu na razvoj specifične mikrostrukture te vrste betona. Dosadašnja istraživanja su pokazala da mikrostruktura materijala na bazi cementa ima značajan utjecaj na promjenu svojstava uobičajenih betona izloženih visokim požarnim temperaturama. U radu je provedeno istraživanje utjecaja visokih požarnih temperatura (do 800 °C) na promjenu mehaničkih (naponsko-deformacijski odnos, tlačna čvrstoća i modul elastičnosti) i mikrostrukturnih svojstava samozbijajućih betona s dolomitnim agregatom i filerom. Jedan dio cementa u pojedinim mješavinama je zamijenjen mineralnim dodatkom i to: metakaolinom 5-15 %, letećim pepelom 20-40 % i vapnencem 5-15 %. Istraživanje je provedeno na 10 različitih mješavina. Na temelju dobivenih rezultata predloženi su bilinearni modeli za predviđanje mehaničkih svojstava samozbijajućih betona nakon djelovanja visokih temperatura u ovisnosti o temperaturi djelovanja i upotrijebljenom mineralnom dodatku u betonskoj mješavini. Nadalje, primjenom akustično-ultrazvučne metode provedena je korelacija između svojstava ultrazvučnih valova i mehaničkih svojstava samozbijajućih betona s ciljem da se omoguću njihova procjena bez daljnjeg razaranja materijala. Identificirani su parametri amplituda i prigušenje ultrazvučnog vala za procjenu tlačne čvrstoće i modula elastičnosti samozbijajućih betona nakon djelovanja visokih požarnih temperatura.



## **dr.sc. Marija Kušter Marić**

### **Životopis**

Rođena 1982. u Varaždinu. Diplomirala je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2007., gdje se zaposlila iste godine kao stručni suradnik, kasnije kao znanstveni novak - asistent, a od 2014. radi kao poslijedoktorand. Tijekom izrade disertacije znanstveno se usavršavala na Institutu za građevne materijale Sveučilišta u Stuttgartu. Kao suradnik na projektu osvojila je 2008. prvu nagradu Grada Zagreba za idejno rješenje mosta Bundek i 2012. CCC nagradu za najbolji rad prezentiran na 8. srednjoeuropskom kongresu o betonskim konstrukcijama. Glavna područja njenog istraživačkog rada su: kodiranje i numeričko modeliranje konstrukcija, predviđanje uporabnog vijeka, projektiranje, trajnost i gospodarenje mostovima, estetika mostova te multidisciplinarni pristup projektiranju i održavanju mostova.

Mentori: Prof.dr.sc. **Jure Radić** i Prof.dr.sc. **Joško Ožbolt**

Datum obrane: 23. 12. 2013.

### **Naslov disertacije**

## **Predviđanje uporabnog vijeka armiranobetonskih mostova izloženih kloridima**

### **Sažetak**

U okviru doktorskog rada istraženi su mogući iskoraci u području modeliranja degradacijskih procesa armiranobetonskih mostova izloženih kloridima i mehaničkim oštećenjima. Kako bi se omogućilo realistično predviđanje uporabnog vijeka armiranobetonske konstrukcije izložene kloridima i mehaničkim oštećenjima, razvijen je jedinstveni 3D kemijsko-higrološko-termomehanički model. Za vremenski promjenjivu analizu korozijskih procesa prije i poslije depasivacije čelika u betonu modelirani su sljedeći fizikalni, elektrokemijski i mehanički procesi: pronos kapilarne vode, topline, kisika i klorida kroz zaštitni sloj betona; vezanje klorida u betonu; katodna i anodna polarizacija; pronos OH- iona kroz elektrolit u porama betona; raspodjela električnog potencijala i gustoće struje; mehanička oštećenja te interakcija između mehaničkih i nemehaničkih procesa. U okviru ovog istraživanja analizirani su degradacijski (mehanički i korozijski) procesi na armiranobetonskim mostovima te uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima. Mikroravninski model za beton primijenjen je za numeričku simulaciju raspucavanja armiranobetonske kolničke ploče mosta uslijed statičkog opterećenja na krutu betonsku odbojnu ogradu. Numerička simulacija korozijskih procesa koristeći 3D kemijsko-higrološko-mehanički model provedena je na detalju stupa kao najoštećenijega elementa Krčkog mosta. Parametarskom analizom i sintezom dobivenih rezultata kvantitativno je utvrđen utjecaj različitih parametara konstrukcije i okoliša na procese korozije armature u betonu.

## **dr.sc. Ivan Lukačević**

### **Životopis**

Rođen je 1983. u Novoj Gradiški. 2002. godine se upisuje na Sveučilište u Zagrebu na Građevinski fakultet, na kojem je i diplomirao u travnju 2008. na konstruktorskom usmjerenju. U lipnju 2008. zaposlio se na tom fakultetu kao asistent - znanstveni novak te se upisao na poslijediplomski doktorski studij građevinarstva, usmjerenje Inženjerske konstrukcije. Disertaciju iz polja građevinarstva u području tehničkih znanosti obranio je 2014. Od 2014. godine zaposlen je kao poslijedoktorand na Građevinskom fakultetu. Aktivno je sudjelovao u radu dva znanstvena domaća i dva strana projekta i u koautorstvu objavio jedanaest znanstvenih radova i tri knjige. Područje znanstvenoga djelovanja su mu čelične i spregnute konstrukcije s naglaskom na umor i pouzdanost.

Mentor: Prof.dr.sc. **Darko Dujmović**

Datum obrane: 27. 5. 2014.

### **Naslov disertacije**

## **Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izloženih umoru**

### **Sažetak**

Istraživanje obuhvaća model procjene umora vezan na nominalne napone i S-N krivulje. Primarno je usmjereno na ujednačavanje razina pouzdanosti različitih konstrukcijskih detalja budućih čeličnih konstrukcija izloženih umoru. Općenito je model procjene umora izložen nepouzdanostima otpornosti i djelovanja. Nepouzdanosti otpornosti analizirane su stohastičkim postupcima na postojećim podacima ispitivanja. Kao rezultat, nepouzdanosti otpornosti kvantificirane su i svrstane u određene skupine ovisno o kategorijama detalja. Nepouzdanosti djelovanja istražene su ispitivanjima i simulacijama na numeričkim modelima. Kao rezultat razvijen je postupak procjene pouzdanosti odnosno trajnosti postojećih čeličnih konstrukcija izloženih umoru. Taj postupak uključuje mogućnost procjene pouzdanosti detalja u konstrukcijama na kojima nije moguće provesti ispitivanje. Kvantificirajući navedene nepouzdanosti formiran je stohastički model na temelju kojega su postupkom kalibracije izračunani optimalni skupovi parcijalnih faktora otpornosti i djelovanja. U postupku kalibracije uzeta je u obzir diferencijacija razina posljedica otkazivanja konstrukcija izloženih umoru, metode procjene umora preporučene u europskoj normi te nepouzdanosti otpornosti i djelovanja. Predložen je poboljšani postupak procjene pouzdanosti, odnosno trajnosti postojećih čeličnih konstrukcija izloženih umoru te je definirana nova metoda proračuna čeličnih konstrukcija izloženih umoru, koja rezultira ujednačenim razinama pouzdanosti različitih kategorija detalja.

## dr.sc. Ivan Marović

### Životopis

Ivan Marović rođen je 1982. u Splitu. Diplomirao je 2006. na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Splitu. Od 2007. radi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u svojstvu asistenta na Katedri za organizaciju i tehnologiju građenja. U travnju 2013. ostvaruje stupanj doktora znanosti na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Hrvatski savez građevinskih inženjera mu dodjeljuje nagradu za najbolji doktorski rad iz područja građevinarstva u 2013. godini. (područje: Organizacija građenja). Aktivan je istraživač u interdisciplinarnom području znanosti (polje građevinarstvo i ekonomija) i autor nekoliko desetaka znanstvenih radova koji se odnose na različite aspekte projektnog menadžmenta i životnog ciklusa projekata, kvantitativnih metoda u području odlučivanja naročito za potrebe upravljanja projektima u graditeljstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. Ivica Završki

Datum obrane: 12. 4. 2013.

### Naslov disertacije

## Sustav za podršku odlučivanju u upravljanju vrijednostima nekretnina

### Sažetak

U doktorskom su radu dani rezultati istraživanja uspostave sustava za podršku odlučivanju u upravljanju vrijednostima nekretnina kroz četiri cjeline. Prva cjelina obrađuje teorijski okvir sustava za podršku odlučivanju i njihovu modeliranju te teoriju odlučivanja. Pritom je posebna pozornost usmjerena na višekriterijsko odlučivanje i pripadajuće metode koje su značajne odrednice ovog istraživanja. Druga cjelina bavi se nekretninama i njihovim upravljanjem. Predstavljene su metode i pojedinačne i masovne procjene vrijednosti nekretnina koje su korištene u sljedećoj cjelini ovog rada. Treća cjelina iskazuje modeliranje sustava za podršku odlučivanju u upravljanju vrijednostima nekretnina. Teorijske osnove predloženog modela sustava predstavljene su iskazom njegove strukture za sve tri hijerarhijske razine odlučivanja i elemenata koji ga sačinjavaju, gdje je objašnjeno i funkcioniranje sustava za podršku odlučivanja u upravljanju vrijednostima nekretnina. Drugim dijelom ove cjeline predstavljena je struktura baze modela sustava. Pritom su predstavljeni novi modeli iz baze modela, a služe za rješavanje svih tipova zadaća koje se mogu pojaviti pri upravljanju vrijednostima nekretnina. Podrška odlučivanju pri rješavanju strukturiranih zadaća osigurana je uspostavom modela *Vrijednost zone* (VZ), a za slabo strukturirane i nestrukturirane zadaće uspostavljeni su modeli *Rangiranje zona* (RZ) i *Model za donošenje strateške odluke* (MSO). U zadnjoj cjelini provedena je validacija razvijenog sustava za podršku odlučivanju u upravljanju vrijednostima nekretnina na području grada Splita s podacima za 2011. i 2012. godinu.

## **dr.sc. Bojan Milovanović**

### **Životopis**

Rođen u Čakovcu 1984. godine, a diplomirao na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2007. godine. U svom znanstvenoistraživačkom radu bavi se problematikom vezanom uz energetske učinkovitost, građevinsku fiziku i nerazorna ispitivanja (ponajprije infracrvenom termografijom), pri čemu je samostalno i u koautorstvu objavio brojne znanstvene i stručne radove u znanstvenim i drugim časopisima, u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom te je održao 40 izlaganja na skupovima stručnog i znanstvenog usavršavanja. Aktivno radi na većem broju EU i domaćih projekata. U 2010. završio je Program izobrazbe osoba koje provode energetske preglede i energetske certificiranje zgrada. U 2009. završio je Program izobrazbe za ovlaštene termografiste. Sudjeluje u radu tehničkih odbora TO 570 i TO 163 pri HZN.

Mentor: Prof.dr.sc. Ivana Banjad Pečur

Datum obrane: 7. 10. 2013.

### **Naslov disertacije**

## **Karakterizacija oštećenja armiranog betona primjenom metode infracrvene termografije**

### **Sažetak**

Nerazorna ispitivanja primjenom infracrvene (IC) termografije sastoje se od toplinske stimulacije objekta i praćenjem promjene temperature na njegovoj površini tijekom nestacionarnog hlađenja ili zagrijavanja. Postojanje nehomogenosti utječe na širenje topline te time uzrokuje lokalne promjene u temperaturnom polju koje se bilježe IC kamerom. U ovom radu je razvijena metodologija za toplinsku stimulaciju armiranog betona u svrhu određivanja oštećenja. Provedeno je istraživanje stanja područja nerazornih ispitivanja materijala i konstrukcija metodom IC termografije. Provedena su ispitivanja toplinskih svojstava tri vrste betona od kojih su izrađeni uzorci, a sve u svrhu točnijeg određivanja toplinske provodljivosti, toplinske efuzivnosti i difuzivnosti koja su potrebna prilikom određivanja dubine na kojoj se nalaze oštećenja. Razvijena je metodologija za provođenje ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija s posebnim naglaskom na metode toplinske pobude, tehnike prikupljanja termograma i naknadne obrade sekvencija termograma te analize rezultata mjerenja. Kod naknadne obrade rezultata ispitivanja korištene su: termografija koračnog grijanja (SH); termografija faznog impulsa (PPT), fazni i amplitudni prikaz; termografija glavnih komponenti (PCA); tehnika naknadne obrade rezultata ispitivanja pomoću korelacijskih operatora. Sve je to dovelo do napretka u mogućnosti otkrivanja oštećenja u slučaju primjene navedenih metoda. Razvijeni su i modeli za karakterizaciju oštećenja uz uvjet poznavanja toplinske difuzivnosti betona, vremenskog razvoja krivulje temperaturnog kontrasta te koeficijenta kalibracije modela. Zaključeno je da je metodu aktivne IC termografije moguće primijeniti za detekciju i kvantifikaciju oštećenja u armiranobetonskim konstrukcijama.

## **dr.sc. Maja-Marija Nahod**

### **Životopis**

Maja-Marija Nahod rođena je 1979. u Zagrebu, diplomirala je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (GF) 2004. na usmjerenju Konstrukcije; magistrirala 2010. te doktorirala 2014. godine. Od 2004. do danas zaposlena je na Zavodu za organizaciju i ekonomiku građenja GF-a. Ovlašteni je inženjer građevinarstva, ovlašteni energetske certifikator zgrada, sudski vještak i evidentirani voditelj projekata. Nositelj je predmeta Građevinske regulativa, Proučavanje rada i Organizacija rada na GF-u, te aktivno sudjeluje na predmetima iz područja upravljanja projektima i organizacije građenja. Sudjeluje u projektima praćenja i kontrole, stručnom nadzoru i izradi tehničke projektne dokumentacije. U koautorstvu je objavila preko 40 znanstvenih radova.

Mentor: Prof.dr.sc. **Mladen Radujković**

Datum obrane: 29. 5. 2014.

### **Naslov disertacije**

## **Utjecaj kompetentnog upravljanja promjenama na uspješnost građevinskih projekata**

### **Sažetak**

Uspješnost građevinskih projekata već desetljećima pokazuje poražavajuće rezultate. Bez obzira na razvoj tehnologije, metodologija i procedura upravljanja projektima, slaba uspješnost projekata upućuje na zanemarivanje nekih segmenata upravljanja. Zbog promjena u projektima dolazi do prekoračenja početno zadanih ograničenja, često na štetu uspjeha projekata. Postavlja se pitanje utjecaja kompetentnog upravljanja promjenama na uspješnost građevinskih projekata te koje su kompetencije i procedure upravljanja promjenama potrebne za pozitivan doprinos uspjehu projekata. Te vještine se trebaju povezati sa sposobnošću voditelja projekta da prihvati sva prethodno zadana ograničenja na projektu. U građevinskoj praksi se može identificirati različita manifestacija i konačni rezultat projekata s istim procedurama, no drugim ljudima kao donositeljima odluka, što potvrđuje važnost postavljenih istraživačkih pitanja. Razmatraju se promjene u fazama trajanja projekta u kojima postoji utjecaj upravljanja projektom (prije korištenja, tj. do završetka izvršenja) te utjecaj kompetentnog upravljanja promjenama na konačni uspjeh projekata u cjelokupnom razdoblju. Kao rezultat, razvija se metodologija koja će u sebi integrirati utjecaje kompetentnog upravljanja promjenama na uspjeh građevinskih projekata i omogućiti kao potpora odlučivanju u projektima objektivno sagledavanje mogućnosti odobrenja zahtijevanih promjena na projektima. Nakon detaljno provedene analize svih prikupljenih podataka iz stanja područja i rezultata dijelova istraživanja, nađen je skup ključnih kompetencija. Konačno, dokazuje se da je utjecaj kompetentnog upravljanja promjenama na uspjeh građevinskih projekata moguće odrediti te da kroz njegovo određivanje projekt može biti vođen tako da je uvijek djelovanje na projektu usmjereno na ostvarenje ciljeva projekta.

## **dr.sc. Josip Pišković**

### **Životopis**

Josip Pišković rođen je 23. listopada 1984. u Zagrebu. Osnovno i srednjoškolsko obrazovanje završio je u Zagrebu. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisao je 2003. godine te diplomirao u veljači 2009. U lipnju 2009. zaposlio se na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za konstrukcije, Katedra za metalne konstrukcije, kao asistent-znanstveni novak. Poslije-diplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, usmjerenje Inženjerske konstrukcije, upisao je 2009. godine.

Mentor:            Prof.dr.sc. **Darko Dujmović**

Datum obrane: 10. 4. 2015.

### **Naslov disertacije**

## **Pouzdanost priključaka pravokutnih šupljih profila izvedenih čelnim pločama i vijcima**

### **Sažetak**

Proračun priključaka s čelnim pločama i vijcima presjeka I i H obuhvaćen je u 6. poglavlju EN 1993-1-8, ali se ne daju preporuke za isti tip priključaka pravokutnih šupljih profila. Istraživanja pokazuju da primjena metodologije poglavlja 6 na proračun otpornosti priključaka pravokutnih šupljih profila ne daje zadovoljavajuće rezultate. Za proračun tog tipa priključka zasada postoji nekoliko analitičkih modela za proračun otpornosti. Vrednovanje tih modela probabilističkim metodama teorije pouzdanosti proračunom indeksa pouzdanosti omogućit će njihovu znanstveno argumentiranu usporedbu i dati smjernice za usvajanje određene metode u novoj generaciji europskih normi. Nadalje, kod priključaka s četiri vijka izvan širine pojasnica, javljaju se kutni mehanizmi linija tečenja koji nisu sadržani u EN 1993-1-8. Istraživane su konfiguracije priključka koje rezultiraju takvim mehanizmom otkazivanja te utjecaj zavarenih ukrućenja na otpornost, krutost, deformacijski kapacitet i pouzdanost takvog priključka.

## **dr.sc. Kristina Potočki**

### **Životopis**

Kristina Potočki, djevojačko Novak, rođena je 1980. godine u Zaboku. Diplomirala je 2006. na Sveučilištu u Zagrebu Građevinski fakultet, smjer Hidrotehnika. Zaposlena je kao poslijedoktorandica na istom fakultetu i sudjeluje u nastavnom procesu predmeta diplomskog i dodiplomskog studija kao asistentica. Primarni interes istraživanja joj je analiza hidroloških vremenskih serija. Tijekom studija bila je nagrađena kao najbolja studentica 3. godine, a dobila je i nagradu Hrvatskih Voda za najbolji diplomski rad iz područja vodnog gospodarstva. Članica je Hrvatskog hidrološkog društva i Hrvatskog društva za odvodnju i navodnjavanje. Služi se engleskim i njemačkim jezikom.

Mentor: Prof.dr.sc. **Neven Kuspilić**

Datum obrane: 14. 11. 2014.

### **Naslov disertacije**

## **Primjena valične transformacije u analizi hidroloških vremenskih serija**

### **Sažetak**

Polazište istraživanja je primjena metode valične transformacije za analizu mjesečnih hidroloških serija na tri vodotoka u Hrvatskoj u svrhu lakšega detektiranja promjena u varijacijama serija na unutargodišnjim i višegodišnjim vremenskim skalama. Provedena je identifikacija i usporedba perioda u vremenskim serijama protoka, pronosa suspendiranog nanosa i globalnih klimatskih indikatora (ENSO i NAO), te ispitivanje doprinosa perioda trendu serija protoka. Analiza perioda provedena je kontinuiranom valičnom transformacijom (CWT), a utjecaj perioda na trend rastavljanjem serija s diskretnom valičnom transformacijom (DWT) na različite vremenske skale i njihovo testiranje Mann-Kendallovim testom trenda. Dobiven je pregled značajnih perioda za sve analizirane serije, a test trenda pokazao je statistički značajan doprinos negativnom trendu protoka unutargodišnjih i međugodišnjih komponenti (do 3 godine) na sve tri VS na rijeci Savi za razdoblje 1964.-1994. Također je provedeno modeliranje mjesečnog pronosa suspendiranog nanosa u zavisnosti od (i) hidroloških varijabli (protoka i pronosa nanosa) te u zavisnosti od (ii) meteoroloških i klimatskih varijabli (oborina, temperatura, standardizirani oborinski indeks, NAO i ENSO). Korišteni su hibridni modeli koji kombiniraju rastavljanje serija s DWT i njihovo unošenje u modele crne kutije: model neuronskih mreža (ANN) i višestruke linearne regresije (MLR). Analizirane su mjesečne serije na slivu Krapine za razdoblje 1991.-2011. i na slivu rijeke Raše za razdoblje 1982.-2000. Rezultati su pokazali da je na oba sliva osnovni model ANN dao bolje rezultate od MLR modela, a hibridni modeli s DWT su dali bolje rezultate za hidrološke ulazne podatke na slivu Krapine i za klimatske ulazne podatke na slivu Raše. Analizirani modeli nisu bili osjetljivi na globalne klimatske indikatore.

## dr.sc. Marijana Serdar

### Životopis

Marijana Serdar, rođena 05.06.1982. godine u Zagrebu, diplomirala 2005. godine te doktorirala 2011. godine iz znanstvenog područja tehničke znanosti, druge temeljne znanosti, grana materijali. Zaposlena je na Zavodu za materijale, Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od prosinca 2005. godine. Vodila je dva samostalna projekta; projekt financiran od strane fonda UKF u sklopu kojeg je tijekom doktorskog studija boravila 6 mjeseci na Sveučilištu u Kaliforniji, Berkeley, te projekt financiran od strane NEWFELPRO Marie Curie FP7-PEOPLE-2011-COFUND u sklopu kojeg je kao poslijedoktorand boravila 2 godine na francuskom Nacionalnom institutu za nuklearnu i alternativnu energiju, CEA. Sudjeluje na nacionalnim i međunarodnim znanstvenim i tehnološkim projektima.

Mentor: Prof.dr.sc. Dubravka Bjegović

Datum obrane: 15. 5. 2011.

### Naslov disertacije

## Granični uvjeti primjene korozijski otpornih čelika kao armatura u betonu

### Sažetak

Jedna od metoda kojima se odgađa ili u potpunosti sprječava pojava korozije jest upotreba određenih vrsta korozijski otpornih čelika, koji su otporniji na koroziju od ugljičnog čelika, dok im je cijena značajno niža od nehrđajućih čelika. U radu su provedena ispitivanja na ukupno 10 vrsta armaturnih čelika. Kod ispitivanja armaturnih čelika u pornoj otopini provedeno je mjerenje promjene potencijala otvorenog strujnog kruga u svrhu praćenja stabilizacije pasivnog filma, te anodna potenciodinamička polarizacija u svrhu određivanja potencijala proboja pasivnog filma. Kod ispitivanja armaturnih čelika u cementnoj pasti i mortu provedeno je ispitivanje elektro-kemijskom impedancijskom spektroskopijom u svrhu određivanja otpora različitih slojeva koji se stvaraju između površine betonskih uzoraka i armaturnih čelika. Galvanostatskom pulsnom metodom praćeno je dugotrajno ponašanje korozijski otpornih čelika u betonu izloženom simuliranoj i realnoj agresivnoj okolini. Pretražnim elektronskim mikroskopom, emisijskom rendgenskom spektroskopijom, rendgenskom mikrodifrakcijom i mikrofluorescijom provedeno je ispitivanje u svrhu određivanja morfologije, kemijskog i mineraloškog sastava korozijskih produkata. U radu se predlaže metodologija za povezivanje vrste čelika s razredima izloženosti konstrukcija te izrazi za povezivanje okolišnog opterećenja i svojstava korozijski otpornog čelika. Dokazana je uporabivost modela s dvije vremenske konstante za analizu impedancijskih spektara i opisivanje ponašanja korozijski otpornih čelika u betonu. Izrađeni su dijagrami propagacije korozije za različite vrste korozijski otpornih čelika te je predložen model formiranja korozijskih produkata kod korozijski otpornih čelika u betonu.



## **dr.sc. Josip Sertić**

### **Životopis**

Josip Sertić rođen je 1983 u Zagrebu. Nakon završetka srednjoškolskog obrazovanja 2001. godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu gdje je diplomirao 2007 godine. Na istome se fakultetu zapošljava 2007. godine kao znanstveni novak. Iste godine upisuje doktorski studij iz znanstvenoga područja tehničkih znanosti, polja građevinarstva, grane organizacije i tehnologije građenja. U sklopu projekta Hrvatske zaklade za znanost proveo je šest mjeseci na Sveučilištu Aalto radi znanstvenoga usavršavanja. U sklopu programa Erasmus 2012. godine sudjeluje u nastavnoj djelatnosti na Tehničkome Sveučilištu u Beču na Zavodu za Interdisciplinarno planiranje i industrijsko građenje.

Mentor: Prof.dr.sc. Ivica Završki

Datum obrane: 22. 5. 2015.

### **Naslov disertacije**

## **Model vrednovanja organizacijske, tehnološke i institucionalne složenosti u građevinarstvu**

### **Sažetak**

Civilizacijska složenost je u neprestanome rastu što se reflektira na građevinsku industriju stoga poduzeća nužno nastoje prilagoditi svoje poslovanje izazovima složenosti. Ova disertacija istražuje sposobnost za složenost u građevinskoj industriji, svojstva poduzeća te sposobnost za tržište. U okviru istraživanja analiziraju se građevinska poduzeća koja pružaju usluge građenja na različitim tržištima. Analiziraju se i organizacijski mehanizmi koji su okosnica poduzeća kao organizacije, a koji utječu na složeno ponašanje. Oni se dijele u šest kategorija koje su već utvrđene teorijom, a analiziraju se uporabom analize učestalosti i klaster-analize. U ovoj se disertaciji organizacijski mehanizmi istražuju u industriji čije je jedno od temeljnih svojstava projektnost te je opseg istraživanja usmjeren na klasičnu projektno-proizvodnu strukturu. Analizira se prisutnost pojedinačnih mehanizama u uzorku i odnos poduzeća unutar toga uzorka, pri čemu su ona grupirana prema sličnostima i razlikama. Na temelju dobivenih rezultata zaključeno je da postoje opći mehanizmi složenosti kojima se koriste sva projektna građevinska poduzeća. No postoje i specifični mehanizmi složenosti koji su karakteristični za pojedini sektor unutar industrije odnosno tržišta te se oni mogu prepoznati kao unutrašnja tržišna barijera na koju poduzeća moraju obratiti pozornost u planiranju nastupa na novome tržištu. Time je proširena koncepcija unutrašnjih tržišnih barijera te se pridonosi teoriji resursa i upravljanju operacijama. Sama namjena modela je podrška u odlučivanju pri razvoju organizacije građevinskog poduzeća.

## **dr.sc. Zvonko Sigmund**

### **Životopis**

Rođen je 1982. u Banja Luci, BiH. 2001. godine upisuje Građevinski Fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Tijekom studija upisao je smjer Konstrukcije na kojem je i diplomirao 2008. Za vrijeme studija biva nagrađen dekanovom nagradom. Tijekom studija kratko vrijeme je radio je i na Rutgers University u New Jersey-u. Nakon diplome i kratkog iskustva u profesiji upisuje poslijediplomski znanstveni studij na Građevinskom Fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje se i zapošljava. Doktorirao je 2014. godine. Tijekom svog znanstvenog djelovanja publicirao je 19 znanstvenih radova, od čega je 3 rada objavljeno u međunarodnim znanstvenim časopisima, a 16 radova objavljeno i prezentirano na međunarodnim skupovima.

Mentori: Prof.dr.sc. **Mladen Radujković** i Prof.dr.sc. **Damir Lazarević**

Datum obrane: 18. 12. 2014.

### **Naslov disertacije**

## **Organizacijski model ublažavanja rizika potresne uvredljivosti javnih zgrada**

### **Sažetak**

U ovom radu predstavlja se sveobuhvatni model za ublažavanje rizika koji se javljaju uslijed ne usklađenosti postojećih karakterističnih zgrada izgrađenih u razdoblju od 1860-1920., koje mogu biti izloženi potresu. U okviru predstavljenog modela predlaže se metoda procjene potresnom oštećenju zgrada, procjene vjerojatnosti i veličina očekivanih šteta, preporučuju se tehnologije ojačanja zgrada te se zaključno predlaže model za procjenu isplativosti provedbe ojačanja i/ili popravka zgrada. Model je predviđen na način koji omogućuje učinkovitu procjenu velikog broja zgrada, te s toga se na ovaj način ne zadovoljavaju samo potrebe državnih projekata većih razmjera, već i interesi i potrebe manjih i/ili privatnih investitora. U tom smislu ostvareni su određeni doprinosi. Predložen je organizacijski model za sustavnu procjenu rizičnosti zidanih zgrada, uzimajući u obzir tehničke, ekonomske, regulativne i organizacijske komponente za odabir prioriteta objekata. Nadalje, postavljen je prijedlog novog modela ocjene potresne otpornosti zidanih zgrada i isplativosti njihovog ojačanja na osnovi procjene očekivanih šteta. Predloženo je i načelo odabira tehnologija ojačanja kojime se pri odabiru ojačanja uzimaju u obzir bitne karakteristike zgrade i tehnologije ojačanja. Osim tih doprinosa, prvi je puta na ovaj način provedeno objedinjavanje temeljnih organizacijskih, ekonomskih i regulatornih znanja s inženjerskom praksom čime se ostvaruju temelji za daljnja istraživanja u ovom području znanosti.

## **dr.sc. Ana Skender**

### **Životopis**

Rođena je 1980. u Zagrebu. Kao apsolventica koristi stipendiju udruge IASTE te boravi tri mjeseca na stručnoj praksi u Njemačkoj. Diplomirala je 20. travnja 2006. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a doktorski rad obranila je 26. studenog 2013. Od studenog 2006. zaposlena je kao asistent - znanstveni novak u Zavodu za tehničku mehaniku matičnog fakulteta gdje također sudjeluje kao voditelj ispitivanja i ispitivač u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija. Područje znanstvenog istraživanja Ane Skender prvenstveno obuhvaća eksperimentalno ispitivanje i numeričko modeliranje konstrukcijskih elemenata koji sadrže polimerne materijale. Objavila je desetak znanstvenih i stručnih radova uključujući i jedan sveučilišni udžbenik. Govori njemački i engleski jezik.

Mentor: Prof.dr.sc. **Joško Krolo**

Datum obrane: 26. 11. 2013.

### **Naslov disertacije**

## **Modeliranje elastomernog materijala u numeričkoj analizi konstrukcijskih ležajeva**

### **Sažetak**

U sklopu ovog istraživanja provedena su eksperimentalna ispitivanja na uzorcima elastomernog materijala, odnosno gume kako bi se utvrdilo realno ponašanje tog materijala. Također je provedeno i opsežno eksperimentalno istraživanje armiranih elastomernih ležajeva s ciljem utvrđivanja utjecaja materijalnih i geometrijskih karakteristika s obzirom na to da se radi o kompozitnim konstrukcijskim elementima. Eksperimentalni rezultati poslužili su i za verifikaciju numeričkih modela. U teorijskom dijelu prikazani su analitički izrazi koji su poslužili kao smjernice za numeričku analizu jer daju pouzdane podatke o utjecaju materijalnih i geometrijskih karakteristika. U pregledu najvažnijih ugrađenih i prilagođenih materijalnih modela za gumu navedene su mogućnosti koje pružaju pojedini materijalni modeli i vrste ispitivanja za provođenje njihove kalibracije. Kalibracija odabranih materijalnih modela provedena je na temelju rezultata pojedinačnih ispitivanja i njihovih kombinacija. Na temelju usporedbe eksperimentalnih rezultata i rezultata numeričke analize elastomernih ležajeva pri djelovanju tlačnog i posmičnog opterećenja provedeno je vrednovanje odgovarajućih materijalnih modela, ali i primjenjivosti rezultata različitih ispitivanja. Za obje vrste numeričkih modela ponuđene su preporuke za modeliranje elastomernog materijala. Izdvaja se značajan znanstveni doprinos na području modeliranja stlačivosti elastomernog materijala u numeričkoj analizi u obliku povezivanja analitičkih izraza za pojedinačne slojeve elastomernog materijala i numeričkih rezultata.

## dr.sc. Ivica Stančerić

### Životopis

Ivica Stančerić rođen je 18. svibnja 1976. u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu pohađao je u Vrbovcu. Diplomirao je 2003. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na usmjerenju Prometnice. Iste godine zapošljava se na Zavodu za prometnice kao asistent te upisuje poslijediplomski studij. Doktorat znanosti iz znanstvenog područja tehničke znanosti, znanstveno polje građevinarstvo, grana prometnice, stekao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. 23. siječnja 2012. izabran je u znanstveno-nastavno zvanje docent na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu gdje i radi na Zavodu za prometnice na znanstvenim, nastavnim i stručnim poslovima vezanim uz projektiranje cesta i cestovnih čvorišta.

Mentor: Prof.dr.sc. Željko Korlaet

Datum obrane: 28. 9. 2011.

### Naslov disertacije

## Teorijske postavke oblikovanja četverokrakih čvorišta u razini na načelima geometrije kretanja vozila

### Sažetak

Dosadašnji pristup oblikovanju čvorišta na kojem se zasnivaju relevantne europske i američke (SAD) smjernice sastoji se od oblikovanja projektnih elemenata čvorišta (prema smjericama), naknadnom ispitivanju proвозnosti (šablonama) te ispravljanju krivo oblikovanih elemenata. Takav pristup ne zadovoljava potrebe korisnika za pouzdanošću i učinkovitošću pri rješavanju projektnih zadataka. Stoga su u radu na četverokrakim čvorištima s kutovima presijecanja osi glavne i sporedne ceste između 45 i 120° ispitane mogućnosti oblikovanja projektnih elemenata čvorišta (otoci, rubovi kolnika) na načelima geometrije kretanja mjerodavnih vozila (autobus i tegljač s poluprikolicom). Ispitivanje preglednosti provedeno je na čvorištima s nepovoljnim kutovima križanja osi cesta zbog problema nedovoljne vidljivosti iz vozila. Rezultati ispitivanja preglednosti na čvorištima pokazali su da je zbog nedovoljne vidljivosti iz vozila potrebno ograničiti kutove presijecanja osi cesta. Za kutove manje od 90° kut presijecanja osi cesta ograničen je na 55°, a za kutove veće od 90° kut presijecanja osi cesta ograničen je na 110°. Na taj način određena je granica između kutova za koje je moguće zadržati os sporedne ceste u pravcu bez rekonstrukcije osi sporedne ceste. Detaljno razrađeni postupci oblikovanja projektnih elemenata iskorišteni su za definiranje novog pristupa oblikovanja četverokrakih čvorišta u razini za kutove presijecanja osi cesta između 55 i 110°. Sistemizirani način rješavanja problema oblikovanja projektnih elemenata čvorišta rezultirao je eliminacijom teško primjenjivih i nepouzdanih postupaka (naknadna kontrola proвозnosti). Dobiveni rezultati istraživanja pokazali su da primijenjeni novi pristup oblikovanja projektnih elemenata čvorišta osigurava predviđene zaštitne bočne širine od 0,5 m uz otoke i 0,25 m uz rubove kolnika.

## **dr.sc. Mislav Stepinac**

### **Životopis**

Rođen je 11. svibnja 1984. u Karlovcu. Osnovnu školu završava u Ozlju, a gimnaziju u Karlovcu. 2008. godine diplomirao je s odličnim uspjehom na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Konstrukcije. U razdoblju od rujna 2008. do srpnja 2012. zaposlen je kao stručni suradnik u Zavodu za konstrukcije. U srpnju 2012. zapošljava se kao asistent na Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu gdje radi na znanstvenim, nastavnim i stručnim poslovima. U nastavi sudjeluje u pripremi i održavanju vježbi iz predmeta Drvene konstrukcije, Lagane konstrukcije, Uvod u konstruktorsko inženjerstvo, Betonske i zidane konstrukcije na pred-diplomskom studiju te predmetu Drvene konstrukcije 2 na konstruktorskom smjeru diplomskog studija. Objavio je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovao na konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentori: Prof.dr.sc. **Vlatka Rajčić** i Prof.dr.sc. **Roko Žarnić**

Datum obrane: 13. 7. 2015.

### **Naslov disertacije**

## **Spojevi kompozitnih sustava drvo-nosivo staklo u potresnom okruženju**

### **Sažetak**

Moderna arhitektura s ostakljivanjem južne strane dovodi do nepravilnog razmještaja mase građevine što dovodi do značajnih torzijskih deformacija pri pojavi potresa. Povećanje primjene stakla djelomično je ograničeno jer ne postoje dostupni i odgovarajući propisi. Nosivo staklo u kombinaciji s drvenim okvirom predstavlja kompozitni sustav koji ima predispozicije za dobro ponašanje prilikom potresa, istovremeno je energetska vrlo efikasno i isplativo, estetski je vrlo prihvatljivo te ima dobre nosive karakteristike. U disertaciji je razvijen sustav s drvenim okvirom i ispunom od lameliranog stakla. Izvedena su monotona i kvazistatička ispitivanja kompozitnih sustava, pri čemu su varirani rubni uvjeti te vrste detalja drvenih okvira. Ispitivanjem kompozitnih sustava monotonim i kvazistatičkim protokolima simulirano je ponašanje sustava u ravni prilikom potresa. Kompozitni paneli pokazuju vrlo dobro ponašanje i odlikuju se dobrim seizmičkim karakteristikama. Usavršen je mehanički model i primijenjen nov način spajanja kompozitnih sustava. Razvijena je metoda spajanja drvenih okvira ulijepljenim čeličnim navojnim šipkama pri čemu se dobio spoj vrlo dobrih karakteristika za kutnu vezu drvenih okvira. U okviru disertacije izrađene su i analitičke simulacije ispitanih kompozitnih sustava. Razvijeni su složeni numerički modeli metodom konačnih elemenata u programskom paketu Ansys. Rezultati laboratorijskih i numeričkih ispitivanja pomoći će u razvoju i oblikovanju propisa za konstrukcijsko staklo unutar europskih normi koje su zasad u fazi pripreme.

## **dr.sc. Marta Šavor Novak**

### **Životopis**

Marta Šavor Novak rođena je 1982. godine u Zagrebu. Na Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisala se 2000. godine. Dobila je nagradu fakulteta za najboljeg studenta na trećoj godini studija te nagradu za postignuti uspjeh tijekom studija s prosjekom ocjena ispita od 4,78. Diplomirala je u travnju 2006., a doktorsku disertaciju obranila je u rujnu 2013. godine na istom fakultetu. Trenutno je zaposlena kao viša asistentica – poslijedoktorandica U Zavodu za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. U znanstvenom radu bavi se širokim područjem numeričkog modeliranja, dinamike konstrukcija i potresnog inženjerstva.

Mentor: Prof.dr.sc. **Damir Lazarević**

Datum obrane: 30. 9. 2013.

### **Naslov disertacije**

## **Utjecaj prostorne promjenjivosti potresne pobude na odziv armiranobetonskih lučnih mostova**

### **Sažetak**

Poboljšanje postupaka seizmičkog proračuna uvijek slijedi nakon analiza oštećenja i rušenja prouzročenih jakim potresima. Studije su pokazale da je prostorna promjena potresnog djelovanja čest razlog nepovoljnog seizmičkog odziva velikih mostova, iako se radi pojednostavljenja postupka taj utjecaj pri seizmičkom proračunu najčešće zanemaruje. U ovom se radu istražuju doprinosi na području seizmičke analize armiranobetonskih lučnih mostova velikih raspona s kolnikom gore, uzimajući u obzir prostorno promjenjivu (nejednoliku) potresnu pobudu. Provedena je parametarska numerička analiza razmatrajući različite proračunske metode. Rezultati su pokazali da nejednolika pobuda nepovoljno utječe na odziv gotovo svih razmatranih veličina kod svih analiziranih mostova, bez obzira na raspon. Ustanovljeno je da i vremenski odmak i gubitak koherencije potresnog vala imaju značajan učinak na odziv kad djeluju pojedinačno ili istovremeno. Dominantni učinak ovisi o razmatranim veličinama i presjecima luka te upotrijebljenim potresnim zapisima, pa se preporučuje proračunom obuhvatiti sve oblike nejednolike pobude. Pokazano je da bi proračun pri nejednolikoj pobudi trebalo napraviti pomoću metode vremenskog prirasta jer su se ostale metode pokazale nedovoljno točnima. Napravljen je vlastiti programski kod za generiranje potresnih zapisa. Dokazana je seizmička otpornost lukova dvaju izvedenih lučnih mostova na tlu Republike Hrvatske primjenjujući metodologiju proračuna koja je razvijena u okviru istraživanja. Prema dostupnim podatcima, ne postoji nijedno sustavno istraživanje odziva ab lučnih mostova pri nejednolikoj potresnoj pobudi, pa osnovni znanstveni doprinos predstavlja utvrđivanje ponašanja takvog nosivog sustava pri spomenutoj pobudi. Rad pridonosi razvoju metodologije proračuna lučnih mostova, sa smjernicama o proračunskih metodama i definiranjem minimalnog raspona luka koji zahtijeva primjenu takvog postupka.

## **dr.sc. Danijel Tenžera**

### **Životopis**

Danijel Tenžera rođen je 4. ožujka 1973. u Zagrebu. Diplomirao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 1999. godine na usmjerenju Konstrukcije. Zaposlen je u poduzeću Hrvatske ceste d.o.o., Zagreb od 2003. godine. U razdoblju od svibnja 2003. do ožujka 2014. radio je za potrebe Baze cestovnih podataka Hrvatskih cesta d.o.o. na prikupljanju i obradi podataka o mostovima. Danas na radnom mjestu glavnog inženjera vodi projekte iz programa izvanrednog održavanja državnih cesta. U Imenik ovlaštenih inženjera građevinarstva upisan je 2007. godine, a 2011. godine stekao je potvrdu za višeg voditelja projekta razine B prema HUUP IPMA sustavu potvrđivanja. Objavio je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovao na konferencijama u zemlji i inozemstvu. Govori engleski jezik.

Mentor: Prof.dr.sc. **Jure Radić**

Datum obrane: 2. 6. 2014.

### **Naslov disertacije**

## **Metodologija održavanja u sustavu gospodarenja mostovima**

### **Sažetak**

Gospodarenje mostovima je specifična djelatnost gospodarenja građevinama koja se intenzivno razvija već dvadeset godina u društvu koje gospodari državnim cestama u Republici Hrvatskoj. U radu je analizirano gospodarenje mostovima kao poslovni proces na osnovi iskustva iz rada u Hrvatskim cestama d.o.o. i recentne literature. Uvedena izvorna procedura gospodarenja mostovima zasnovana je na stranom modelu. U međuvremenu su prikupljana iskustva i podaci koji omogućavaju nadogradnju sustava prilagođeno našim okolnostima i posebnostima. Ova prilagodba temeljni je predmet rada. Izvorni znanstveni doprinosi ovog doktorskog rada su: 1. model ocjenjivanja kvalitete rada inženjera prilikom obavljanja vizualnih pregleda mostova te utvrđivanja i vrednovanja oštećenja; 2. model određivanja trajanja mosta u određenom stanju kada su na raspolaganju male količine podataka u vremenskom slijedu, 3. prijedlog modela koji koristi homogene Markovljeve procese i koji se zasniva na podacima o razdobljima trajanja elementa mosta u određenim stanjima; 4. algoritam strategije održavanja upotrebom Markovljevih lanaca te korištenjem poznatih troškovnika sanacija. Predloženi model planiranja troškova održavanja primjenom Markovljevih lanaca te korištenjem poznatih troškovnika sanacija može se u prvoj fazi izravno integrirati u sustav gospodarenja mostovima. Nakon provedenih analiza podataka o procesima dotrajavanja i njihova povezivanja s ocjenama stanja, u drugoj fazi omogućila bi se primjena modela Markovljevih procesa, čime bi se povećala točnost strateškog planiranja.

## **dr.sc. Mario Uroš**

### **Životopis**

Rođen je 1982. u Dubrovniku. Diplomirao je 2006. na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je 2013. obranio disertaciju. Tijekom studiranja dobio je nagrade fakulteta za najboljeg studenta na drugoj, trećoj i četvrtoj godini studija te je bio demonstrator iz predmeta Građevna statika 1 i 2, a akademske godine 2003./2004. dobio je Rektorovu nagradu. Godine 2007. zaposlio se na matičnom fakultetu u Zavodu za tehničku mehaniku na radno mjesto asistenta. Sudjelovao je na raznim međunarodnim, znanstvenim konferencijama i stručnim skupovima. Objavio je trinaest znanstvenih i tri stručna rada. Područje znanstvenoistraživačkog rada je numeričko modeliranje kod problema stabilnosti konstrukcija.

Mentor: Prof.dr.sc. **Damir Lazarević**

Datum obrane: 7. 6. 2013.

### **Naslov disertacije**

## **Utjecaj složenog izbočenja na poslijekritično ponašanje rešetkastih kupola**

### **Sažetak**

U ovom radu analiziran je utjecaj složenog izbočenja na poslijekritično ponašanje jednoslojnih rešetkastih kupola i dani su postupci proračuna osjetljivosti prema imperfekcijama. Korišteni su teorijski i numerički postupci uz laboratorijske pokuse na umanjnim modelima. Napravljen je vlastiti programski kod koji služi za rješavanje općenitog sustava nelinearnih jednadžbi metodom duljine luka. Provedena je analiza osjetljivosti na imperfekciju pomoću ploha osjetljivosti i pripadnih funkcija gradijenta. Na temelju rezultata određena su područja kritičnih imperfekcija i smjerovi maksimalnog opadanja nosivosti za pojedini statički sustav. Provedeno je eksperimentalno istraživanje čvora jednoslojne rešetkaste kupole na ukupno 17 uzoraka. Eksperimentalnom ispitivanju čvorova kupola prethodilo je opsežno ispitivanje svojstava štapnih elemenata, spojeva i materijala od kojega su napravljene. U svrhu određivanja geometrijskih imperfekcija modela provedena su optička mjerenja geometrije u diskretnim točkama. Analizom numeričkih modela s raznim proračunskim i izmjerenim imperfekcijama ustanovljen je njihov utjecaj na ravnotežne krivulje. Potvrđen je nepovoljni utjecaj složenog izbočenja na nosivost i povećana osjetljivost prema imperfekcijama. Znanstveni doprinos istraživanja ogleda se: a) u dopuni postupka za proračun i ocjenu osjetljivosti prema imperfekcijama jednoslojnih rešetkastih kupola s izraženim problemom složenog izbočenja, b) u razvoju metodologije za procjenu utjecaja interakcije pojedinih oblika izbočenja, c) u unapređenju postupaka za određivanje kriterija osjetljivosti pri složenom izbočenju, d) u izradi jedinstvenog laboratorijskog prototipa.







ISBN 978-953-6272-87-7

