

4. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

10.-11. rujna 2018., 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

Mr. sc. Smiljka Janaček-Kučinić
Zoran Vulelija (engleski)

Tisak

Tiskara Zelina d.d., 2018.

Naklada

150 kom.

ISBN

ISBN: 978-953-8168-29-1

Zagreb, rujan 2018.

CIP zapis

je dostupan u računalnome katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 001006163.

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.

4. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

10.-11. rujna 2018., Zagreb

Zbornik radova

Urednik

Stjepan Lakušić

Organizacijski odbor simpozija

Prof.dr.sc.	Stjepan Lakušić	Prodekan za znanost
Doc.dr.sc.	Mario Bačić	Zavod za geotehniku
Doc.dr.sc.	Dalibor Carević	Zavod za hidrotehniku
Izv.prof.dr.sc.	Ana Mandić Ivanković	Zavod za konstrukcije
Prof.dr.sc.	Alan Filipin	Zavod za matematiku
Prof.dr.sc.	Ivana Banjad Pečur	Zavod za materijale
Izv.prof.dr.sc.	Mladen Vukomanović	Zavod za organizaciju i ekonomiku građenja
Prof.dr.sc.	Tatjana Rukavina	Zavod za prometnice
Izv.prof.dr.sc.	Domagoj Damjanović	Zavod za tehničku mehaniku
Doc.dr.sc.	Silvio Bašić	Samostalna Katedra za zgradarstvo

Predgovor

Znanstvena okupljanja studenata prve godine poslijediplomskoga doktorskog studija, njihovih mentora i nastavnika koja se održavaju na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u sklopu skupa Simpozij doktorskog studija građevinarstva organizirana su i u 2018. godini. Simpoziji doktorskog studija održani u 2015., 2016. i 2017. potvrđuju to da su ovakva okupljanja najbolji način razmjenjivanja iskustava i znanja iz svih područja građevinarstva. Ovaj je Simpozij svakako obogatio Istraživački seminar na doktorskome studiju Građevinskog fakulteta u Zagrebu.

Simpozij doktorskog studija građevinarstva organizira se s ciljem da doktorandi prve godine doktorskog studija kroz rad pripremljen u suradnji s mentorom (studijskim savjetnikom) predstavite trenutačan razvoj područja svojega znanstvenog usmjerenja, odnosno područja istraživanja budućega doktorskog rada. Javna prezentacija, razgovor i rasprava na Simpoziju pružaju doktorandu dodatne smjernice za izradu plana istraživanja te za odabir odgovarajuće metode za provedbu istraživanja. Simpozij doktorskog studija pokazao se prvim važnim korakom u procesu razvijanja vještina i stjecanja kompetencija doktoranada.

Prvi Simpozij doktorskog studija građevinarstva održan je 14. i 15. rujna 2015. za koji je priređen i zbornik svih radova predstavljenih na skupu. Drugi Simpozij održan je 12. i 13. rujna 2016. Osim doktoranada i njihovih mentora s Građevinskog fakulteta u Zagrebu na 2. Simpoziju sudjelovali su i doktorandi s drugih građevinskih fakulteta. Tada je također priređen zbornik svih radova sa skupa, a objavljeni su i sažeci doktorskih radova koji su obranjeni na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u razdoblju od 2011. do 2015. godine. Treći Simpozij održan je 11. i 12. rujna 2017. i također je priređen zbornik svih radova predstavljenih na skupu. U tom su izdanju objavljeni i sažeci doktorskih radova koji su obranjeni na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u razdoblju od 2016. do srpnja 2017.

I za ovaj, četvrti Simpozij doktorskog studija građevinarstva svaki je doktorand prve godine studija priredio rad u koautorstvu s mentorom. Ukupno je priređeno 15 radova, svi su radovi recenzirani i svakome radu u zborniku dodijeljen i DOI (engl. *Digital Object Identifier*), broj koji jednoznačno identificira publikaciju i objavljeni rad te jamči točnost podataka i internetsku lokaciju na kojoj se podaci nalaze.

Zbornik 4. Simpozija doktorskog studija građevinarstva priređen je zahvaljujući velikome trudu svih autora, recenzenata i urednika. Veliku pomoć u pripremi zbornika pružili su i suradnici koji su pridonijeli tomu da se usklade radovi svih autora. Nadam se da će četvrto izdanje Simpozija još više potaknuti aktivno istraživanje u svim područjima građevinarstva. Znanstvena istraživanja doprinose razvoju novih znanja, inovativnosti i izvrsnosti, a to su upravo ključni elementi za razvoj i napredak kako istraživača tako i znanstvene institucije u kojoj se istraživanja provode.

Zagreb, 5. rujna 2018.

Urednik

Prof.dr.sc. **Stjepan Lakušić**

Sadržaj

Predgovor	5
Trodimenzionalna numerička analiza slijeganja temelja zgrada uređaja za pročišćavanje otpadnih voda grada Rijeke	
Stjepan Matić, prof.dr.sc. Meho-Saša Kovačević	9
Određivanje nedrenirane čvrstoće pomoću pokusa padajućeg šiljka	
Luka Pušić, izv.prof.dr.sc. Danijela Jurić Kačunić	23
Statističke metode u geotehnici	
Nicola Rossi, prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević	33
Kratkoročna optimizacija rada hidroelektrana u nizu	
Klaudija Bašić, doc.dr.sc. Damir Bekić	43
Pročišćavanje otpadnih voda internih i individualnih sustava odvodnje elektrokemijskim procesima	
Hana Posavčić, doc.dr.sc. Ivan Halkijević	55
Vrednovanje održivosti mostova kao dijela prometne infrastrukture	
Ivana Milić, doc.dr.sc. Jelena Bleiziffer	65
Utjecaj trenja na ponašanje i rad predgotovljenih kompozitnih sustava drvo – nosivo staklo	
Nikola Perković, prof.dr.sc. Vlatka Rajčić	79
Izravni postupak ispitivanja vlačne čvrstoće betona	
Tvrtko Renić, prof.dr.sc. Tomislav Kišiček	91
Dinamički parametri u ocjeni stanja mostova	
mr.sc. Damir Tkalčić, izv.prof.dr.sc. Ana Mandić Ivanović	103
Zaostajanje posmika kod čeličnih nosača	
Hrvoje Vukoja, doc.dr.sc. Anđelko Vlašić	111
Kvantificiranje utjecaja linijskih toplinskih mostova metodom infracrvene termografije	
Mergim Gaši, doc.dr.sc. Bojan Milovanović	119
Primjena pepela drvene biomase u cementnim kompozitima	
Karmen Kostanić Jurić, prof.dr.sc. Nina Štirmec	131
Analiza ponašanja armiranobetonske zgrade u potresu	
Filip Cvetko, doc.dr.sc. Mario Uroš, izv.prof.dr.sc. Domagoj Damjanović	139
Sidrenje tkaninom armiranih mortova (TRM) i vlaknima armiranih polimera (FRP) pri pojačavanju armiranobetonskih i zidanih elemenata konstrukcija	
Robert Lušo, prof.dr.sc. Tomislav Kišiček	149

Interdisciplinarni i multidisciplinarni pristup istraživanju tijekom izrade doktorskog rada	
doc.dr.sc. Gordon Gilja	161
Suradnja sa Sveučilištem u Stuttgartu tijekom i nakon doktorskog studija	
dr.sc. Marija Kušter Marić	163
Sažeci obranjenih doktorskih radova: rujan 2017. - srpanj 2018.	165

Trodimenzionalna numerička analiza slijeganja temelja zgrada uređaja za pročišćavanje otpadnih voda grada Rijeke

Stjepan Matic¹, prof.dr.sc. **Meho-Saša Kovačević²**

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, smatic@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, msk@grad.hr

Sažetak

U ovome radu, koji se odnosi na temeljenje zgrada novog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) grada Rijeke, daje se osnovni prikaz odabrane tehnologije temeljenja objekata UPOV-a te njihov proračun. Cilj je ovog rada, na temelju odgovarajućih geotehničkih parametara i kontaktnih naprezanja na razini dna temeljnih ploča pojedinih objekata te iz situacije predmetne mikrolokacije, izraditi model temeljnog tla i temelja objekata primjenom proračunskog programa PLAXIS 3D, zasnovanog na metodi konačnih elemenata, te naposljetku interpretirati dobivene rezultate, prije svega ukupna slijeganja objekata novog UPOV-a.

Ključne riječi: temeljenje, model temeljnog tla i temelja objekata, PLAXIS 3D, metoda konačnih elemenata, ukupno slijeganje

Three-dimensional numerical analysis of building foundations settlement at the City of Rijeka wastewater treatment plant

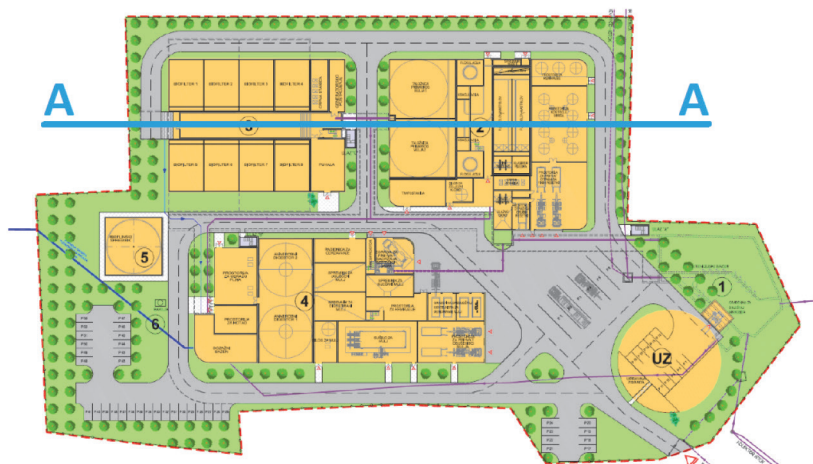
Abstract

This paper deals with foundations of the new wastewater treatment plant (WWTP) of the city of Rijeka, and provides a basic overview of the foundation technology selected for WWTP facilities, as well as relevant calculations. The aim of the paper is to create a foundation soil and building foundations model using the PLAXIS 3D finite element calculation program, based on appropriate geotechnical parameters, contact stresses at the bottom of foundations of individual buildings, and relevant site layout information. The results obtained in the scope of this study, total settlements of the new WWTP facilities in particular, are interpreted in the final part of the paper.

Key words: foundation work, foundation soil and building foundations model, PLAXIS 3D, finite element method, total settlement

1 Uvod

Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) na predmetnoj lokaciji već postoji. No, iako je trenutačno u funkciji, kod postojećeg UPOV-a često dolazi do prekoračenja graničnog stanja uporabivosti. Naime radi izrazite heterogenosti temeljnog tla na predmetnoj lokaciji kao i varijabilnih fizikalno-mehaničkih karakteristika temeljnog tla, koji se najviše očituju u maloj krutosti materijala te nezadovoljavajućoj zbijenosti nekontrolirano nasipanog materijala, dolazi do diferencijalnih slijeganja objekata UPOV-a te do česte potrebe za zamjenom određenih dijelova radi prekoračenja njihove uporabivosti. Upravo zbog ove spoznaje, zajedno s provedenim istražnim radovima koji su to i potvrdili, pristupilo se pronalaženju rješenja problema temeljenja objekata novog UPOV-a.



Slika 1. Tlocrt budućeg UPOV-a grada Rijeke

Planirani uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Rijeke sastoji se od šest različitih objekata koji se upotrebljavaju u tehničko-tehnološkom procesu pročišćavanja otpadnih voda i koji svi čine jednu zasebnu cjelinu, slika 1. Objekti su različitih tlocrtnih dimenzija od čega je najmanji retencijski spremnik okvirnih dimenzija 30×35 m, a najveća zgrada za mehaničku obradu i primarno pročišćavanje otpadnih voda dimenzija 55×60 m. Objekti se temelje na dubini od 0,5 do 7,0 metara od površine terena. Promatrano područje novog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda grada Rijeke nalazi se na gradskoj lokaciji Delta uz ušće rijeke Rječine. Prirodni teren na lokaciji je bitno izmijenjen nasipavanjima tijekom izgradnje luke i širenja grada od kraja 19. st. pa sve do danas. Objekti novog UPOV-a grada Rijeke nalaze se na lokaciji s nasipanim materijalom varijabilne debljine, nekontrolirane zbijenosti i nepoznatih

fizikalno-mehaničkih karakteristika, ispod kojega se nalaze depoziti sedimentnog materijala gdje se izmjenjuju slojevi koherentnog i nekoherentnog materijala relativno nepovoljnih fizikalno-mehaničkih karakteristika, te stijenske podloge pretežno sastavljene od vapnenaca i dolomita. Da bi se zadovoljilo granično stanje uporabivosti i nosivosti objekata novog UPOV-a grada Rijeke predloženo je nekoliko rješenja problema, a modeliranjem svakog pojedinog rješenja u programu PLAXIS 3D prikazane su razlike u slijeganjima.

Prva solucija je temeljenje objekata na zabijanim pilotima od čeličnih cijevi koji završavaju u stijenskoj podlozi na dubinama od 61 do 80 metara. Glavna zamisao je "zaobilazanje" slojeva slabijih fizikalno-mehaničkih karakteristika, i prenošenje opterećenja u dobro nosive slojeve, te samim time reduciranje ukupnih slijeganja, a naročito diferencijalna slijeganja objekata. U drugom slučaju odabrano je korištenje zabijanih pilota kako bi se zaobišao sloj nasipanog materijala varijabilne dubine od 4,5 do 21 metra, a sloj sedimentnog materijala ojačao metodom mlaznog injektiranja do dubine od 50 metara. Ova solucija je razrađena u dva dijela. Modeliranjem mlaznoinjektiranih stupnjaka na mjestima zabijanih pilota te modeliranjem kompozita tla s rasterom mlaznog injektiranja od $7 \times 7,5$ metra. Također je provedena i provjera kakva bi se slijeganja ostvarila ako bi se objekte temeljilo samo na temeljnim pločama.

2 Temeljenje na pilotima

Temelje možemo definirati kao najdonje dijelove konstrukcije preko kojih se ona oslanja na tlo, odnosno preko kojih se djelovanja na konstrukciju prenose na tlo. Budući da je tlo u pravilu bitno mekši i slabiji materijal od uobičajenih materijala iz kojih je izgrađena konstrukcija, temelji su prijelazni dijelovi u kojima se preraspodjeljuju unutrašnje sile iz elemenata konstrukcije u masivne i široke zone tla. Vrste temelja su mnogobrojne i mogu se podijeliti na različite načine. Najuobičajenije je [1] po načinu prijenosa opterećenja u tlo, pa se tako temelji dijele na plitke, duboke te njihovu kombinaciju. Svrha podjela je obično pojednostavljenje komunikacije među inženjerima, a kriteriji su obično način izvođenja ili metoda dokazivanja mehaničke otpornosti i stabilnosti temelja [2]. Plitki temelji prenose opterećenje u plitke slojeve tla, duboki prenose opterećenje ili u dublje slojeve ili u sve slojeve duž njihove visine, dok se kombinirani temelji najčešće koriste za jako opterećene temelje i prenose opterećenja na tlo podjednako preko svih elemenata od kojih su sastavljeni. Granica između plitkih i dubokih temelja nije striktno definirana, ali se kao gruba podjela može prihvatiti ona po kojoj je dubina ukopavanja temelja u tlo manja od širine temelja [3]. Duboki temelji se dijele na pilote, bunare, kesone te neke druge manje zastupljene vrste, a ovdje će se prikazati vrsta pilota predviđena za temeljenje objekata novog UPOV-a.

2.1 Podjela pilota

Pod pilotima smatramo uspravne ili gotovo uspravne stupove izgrađene sa svrhom prenošenja opterećenja građevine u dublje, bolje nosive slojeve tla. Temeljenje građevina na pilotima ima sve učestaliju primjenu, kako zbog izvedbe sve zahtjevnijih konstrukcija, tako i zbog većeg korištenja (geotehnički) nepovoljnijih lokacija, te razvoja novijih tehnoloških rješenja koja omogućuju tržišnu atraktivnost i konkurentnost. Nekad je bilo moguće podijeliti pilote, s obzirom na način izvedbe, na zabijane i bušene. Prvi su se izvodili zabijanjem predgotovljenih pilota ili njihovih elemenata u tlo posebnim strojevima s maljem. Drugi su se izvodili bušenjem bušotine odgovarajućeg promjera do tražene dubine te ugradnjom armature i smjese svježeg betona u pripremljenu bušotinu. Takva je podjela primjerena u mnogim slučajevima, ali joj je nedostatak da izostavlja mnoge vrste pilota koji se danas koriste u praksi, te ne odražava način kako izvedba pilota utječe na njegovu nosivost. Druga, mnogo temeljitija, podjela pilota je po načinu kako njihova izvedba utječe na njihovu nosivost. Ta podjela pilote dijeli na "razmičuće" i na "nerazmičuće". Prvi pri ugradnji razmiču tlo i time povećavaju bočne pritiske tla na svoj plašt, a time prema zakonu trenja i čvrstoću na kontaktu tla i plašta pilota. Skupini razmičućih pilota pripadaju zabijeni piloti sa zatvorenim dnom. Druga vrsta ne razmiče tlo, a u nju možemo svrstati bušene piloti i zabijene šuplje pilote tanke stijenke s otvorenim dnom. Međutim, niti ta podjela ne obuhvaća mnoge vrste pilota koji se danas koriste u praksi [3].

2.1.1 Šuplji čelični piloti s otvorenim dnom

Šuplji čelični piloti su najčešće cilindričnog ili poligonalnog oblika poprečnog presjeka. Piloti takvog poprečnog presjeka prevladavaju probleme vezane s fleksibilnošću tankih čeličnih pilota H presjeka, iako u rijetkim slučajevima tijekom zabijanja može doći do začepljenja otvora zemljanim materijalom, to jest zemljani materijal formira čep i daljnjim zabijanjem miče se zajedno s pilotom, pa takav pilot iz malo razmičućeg prelazi u jako razmičući pilot. Pojava zemljanih čepova je vrlo rijetka prilikom ugradnje šupljih čeličnih pilota dinamičkim metodama, ponajprije zbog visoke inercijske otpornosti zemljanih čepova, a mnogo je češća prilikom ugradnje statičkim metodama. Takav tip pilota ističe se velikom otpornošću na savijanje, a dostupnost poprečnih presjeka velikih profila omogućuje prenošenje značajnih opterećenja. Takva kombinacija značajki dovela je do njihove učestale primjene u marinskim konstrukcijama, kao što su gatovi i pristaništa za brodove [4, 5].

3 Mlazno injektiranje

Mlazno injektiranje ili *jet grouting* je tehnologija, odnosno metoda ojačanja tla. Metoda funkcionira na način da se u tlo utiskuje cijev do projektirane dubine te postupnim izvlačenjem uz konstantnu rotaciju, kroz mlaznicu na cijevi pod visokim tlakom izbacuje cementnu smjesu pa miješanjem s okolnim tlom određen volumen tla pretvara u zemljani mort kako bi nastajala homogenizirana masa poboljšanih svojstava [6]. Uspješno se primjenjuje u svim vrstama tla, uključujući i glinu te organske slojeve, a može se koristiti i u stjenovitom tlu. Promjer razarajućeg djelovanja mlaza u tlu može biti čak do 5 metara, a ovisno o vrsti tla i načinu izvođenja. U praksi su evidentirani slučajevi gdje se ojačanje tla postupkom mlaznog injektiranja provodilo na dubinama većim i od 40 metara [7].

Mlazno injektiranje često se primjenjuje za privremenu ili trajnu stabilizaciju mekih tala. Metoda je iznimno uspješna kod reduciranja slijeganja ili povećanja nosivosti temeljnog tla, te se u tom smislu koristi i na lokacijama budućih građevina ali i za podinjektiranje postojećih građevina. Sustavi koji su zasad u primjeni razlikuju se po tipu bušućih kruna, nosača mlaznica te efektivnom radijusu djelovanja. Podjela se izvodi prema broju fluida koji se koriste prilikom injektiranja, a kreću se od jednofluidnog do trofluidnog sustava (injekcijska smjesa, zrak, voda te njihova kombinacija), što uz brzinu rotacije i upumpavanja smjese u tlo uvjetuje ostvarivi promjer stupnjaka [7].

4 Odabrani geotehnički parametri

Prilikom provedbe istražnih radova provedena su bušenja te uzimani uzorci na kojima su obavljana laboratorijska ispitivanja. Međutim, količina i vrsta provedenih laboratorijskih pokusa mogu poslužiti tek za okvirnu procjenu fizikalno-mehaničkih karakteristika sedimenata prijelaznog okoliša. Pri tome treba naglasiti da niti jedan uzorak nije uzet iz zone nabačaja. Naime, u laboratoriju su provedeni samo pokusi granulometrijske analize te, u slučaju koherentnih materijala, Atterbergove granice plastičnosti. S obzirom na to da su ovo dominantno klasifikacijski pokusi kojim se određuje vrsta materijala, ali ne i pokusi kojima se mogu pouzdano odrediti fizikalno-mehaničke karakteristike materijala nužne za temeljenje objekata UPOV-a, za procjenu potrebnih parametara korišteni su rezultati terenskog ispitivanja standardnog penetracijskog pokusa (SPT). I ova ispitivanja su rađena samo za slojeve sedimenata prijelaznog okoliša, a nisu i za zonu nabačaja. SPT ispitivanjima su se utvrdile vrijednosti u rasponu $N = 4$ do $N = 28$ udaraca. Pri tome do dubine od 30-ak metara vrijednosti postupno rastu do 13-14 udaraca, nakon čega poprimaju veće vrijednosti. Međutim, ni ovo nije pravilo zato što na pojedinim bušotinama dolazi i do smanjenja broja SPT udaraca s povećanjem dubine. Ispitivanjem uzoraka stijene

u preši, ali i iz korelacije s indeksom točkaste čvrstoće iz PLT ispitivanja, može se procijeniti jednoosna tlačna čvrstoća od 50 MPa. Iz malog obujma istražnih radova se može vidjeti da sedimente prijelaznog okoliša čine slojevi s relativno niskim vrijednostima modula stišljivosti. U nastavku su prikazane proračunske vrijednosti parametara materijala nabačaja, depozita sedimentnih materijala i stijenske podloge. Budući da prilikom istražnih radova nije uzet niti jedan uzorak iz zone nabačaja, parametri materijala potrebni za proračun u PLAXIS-u uzeti su s oprezom. Kod sedimentnih materijala za određivanje kuta unutarnjeg trenja preko broja udaraca SPT-a služilo se korelacijama Shioi i Fukui (1982.) te Dunhama (1954.), a za vrijednosti edometarskog modula elastičnosti korištena je korelacija Tana i dr. (1991.). Ovisno o broju udaraca SPT-a za svaki sloj procijenjena je vrijednost zapreminske težine, a Poissonov koeficijent je procijenjen. Iako su slojevi sedimenta nekoherentni, za svaki sloj zadana je minimalna kohezija vrijednosti 1 kPa radi stabilnosti proračuna u Plaxis-u.

Tablica 1. Proračunske vrijednosti kuta trenja i edometarskog modula

Slojevi tla	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E [kPa]	ν [/]	φ [°]	c [kPa]
Zona nabačaja	22,0	22,0	10000	0,25	30	1
Sedimenti (gornji sloj)	17,0	20,0	5274,3	0,35	25,24	1
Šljunak (proslojci)	19,0	21,0	19249,0	0,30	36,90	1
Sedimenti (gornji sloj)	17,0	20,0	20547,3	0,35	33,90	1

Parametri stijenske mase procijenjeni su ispitivanjem uzoraka stijene u preši, ali i iz korelacije s indeksom točkaste čvrstoće iz PLT ispitivanja. Procijenjena je vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće od 50 MPa. Na temelju podatka da se radi o vapnenačkoj stijeni, pomoću programa RocLab određeni su i ostali parametri potrebni za proračun u PLAXIS-u, pa tako imamo:

$$\gamma_{\text{unsat}} = 26,0 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 26,0 \text{ kN/m}^3$$

$$E = 1271,93 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,25$$

$$\sigma_{\text{ci}} = 50 \text{ MPa}$$

$$m_i = 12$$

$$\text{GSI} = 25$$

$$D = 0$$

$$\psi_{\text{max}} = 45^\circ$$

5 Geotehnički proračun temelja

Geotehnički proračun je proveden na četiri zasebna modela, između kojih se provjerava koja je solucija temeljenja najprihvatljivija iz aspekta zadovoljavanja graničnog stanja uporabivosti, odnosno prije svega ukupnih slijeganja. Opterećenja na razini dna temeljnih ploča objekata variraju, tj. mogu biti od 70 do 250 kPa. Za početak je modelirano temeljenje objekata UPOV-a na temeljnim pločama bez ikakvog dubokog temeljenja ili metoda poboljšanja tla. Drugi model je obuhvatio slučaj temeljenja objekata na pilotima do dubine stijenske podloge. Preostala dva modela analizirala su slučajeve temeljenja na tlu ojačanom mlaznim injektiranjem do dubine 50 metara, s time da se objekti oslanjaju na pilote koji prolaze kroz veoma nepovoljan sloj nabačaja, na kojemu nije moguće provesti postupak mlaznog injektiranja. Analiziran je slučaj u kojemu se mlazno injektirani stupnjaci modeliraju kao produžetci pilota, izvedeni direktno ispod njih, slučaj u kojemu se mlazno injektiranje modelira kao kompozit tla na rasteru 7x7,5 metra, što uzrokuje povećanje krutosti tla.

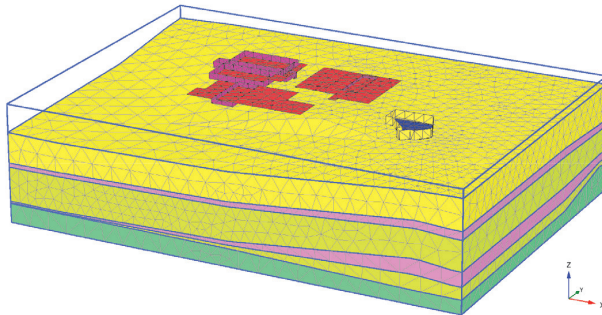
5.1 Program PLAXIS 3D

PLAXIS 3D je računalni program zasnovan na metodi konačnih elemenata i namijenjen za trodimenzionalne analize problema stabilnosti i deformacija u geotehnici. Metoda konačnih elemenata najčešće je korištena metoda radi svoje fleksibilnosti pri definiranju heterogenosti materijala, nelinearnosti i rubnih uvjeta, te relativne fleksibilnosti pri radu sa složenim konstitutivnim modelima. Prilikom modeliranja u programu koji se bazira na metodi konačnih elemenata, tlo ili stijena se podjeli u ograničeni broj elemenata međusobno povezanih u čvorovima. Svaki element je konačan, odnosno definiran je geometrijski i ima ograničenu veličinu. Naponsko-deformacijski odnosi u tlu i na kontaktu tla i konstrukcijskih elemenata su opisani odgovarajućim konstitutivnim zakonom materijala. Naprezanja i deformacije koje se analiziraju su rezultat promijenjenog stanja uslijed izvođenja konstrukcije te svako naprezanje i deformacija jednog elementa utječu na susjedne elemente.

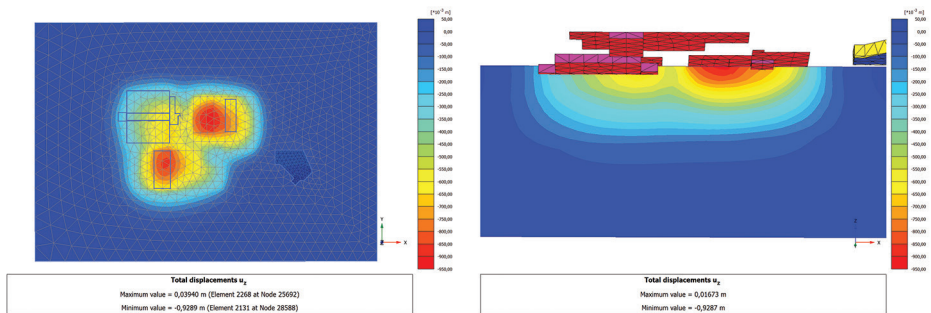
U nastavku rada su prikazani rezultati proračuna za četiri slučaja temeljenja objekata budućeg UPOV-a grada Rijeke, pri čemu je pažnja posebno usmjerena na apsolutno slijeganje cijelog modela i slijeganja u presjeku A-A prikazanom na slici 1.

5.1.1 Model 1 – UPOV Rijeka temeljeno na temeljnim pločama

Na prvom modelu je prikazano temeljenje objekata novog UPOV-a grada Rijeke na temeljnim pločama, bez drugih metoda temeljenja i ojačanja tla, slika 2. Taj je model poslužio kao orijentir razine smanjenja slijeganja u ostalim modelima. Prikaz najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 92,9$ cm na modelu 1 i najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 92,9$ cm na presjeku A-A modela 1 prikazano je na slici 3.



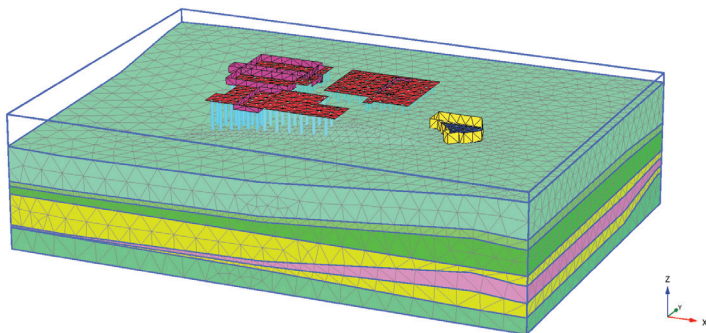
Slika 2. Prikaz generirane mreže za model 1



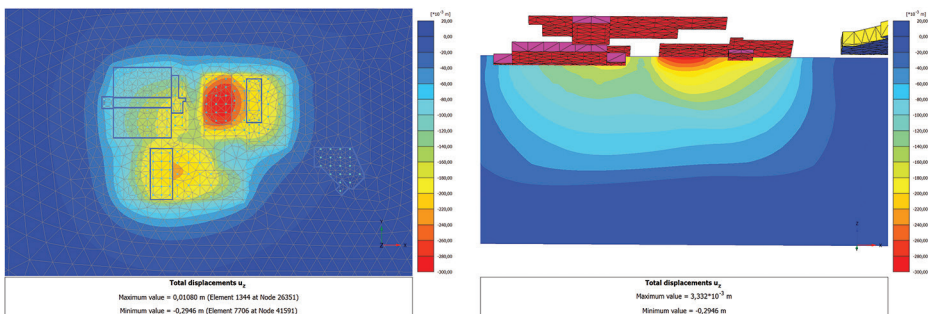
Slika 3. Prikaz najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 92,9$ cm na modelu 1 (lijevo) i najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 92,9$ cm na presjeku A-A modela 1 (desno)

5.1.2 Model 2 - UPOV Rijeka temeljeno na tlu ojačanim mlaznim injektiranjem (kompozit tla 7×7,5 m)

Modelom 2 je prikazano temeljenje objekata novog UPOV-a grada Rijeke na tlu ojačanom mlaznim injektiranjem u rasteru 7x7,5 metara do dubine 50 metara, slika 4. Ojačano tlo je simulirano povećanjem njegove krutosti. Prikaz najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 29,5$ cm na modelu 2 i najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 29,5$ cm na presjeku A-A modela 2 prikazano je na slici 5.



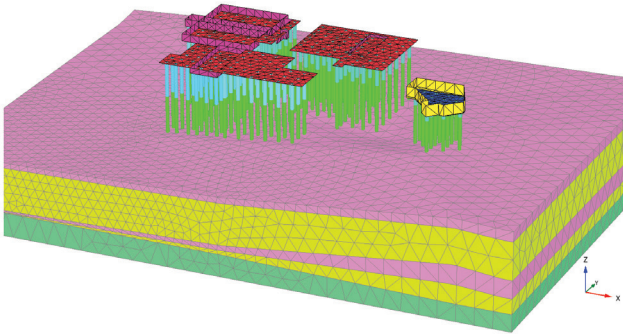
Slika 4. Prikaz generirane mreže za model 2



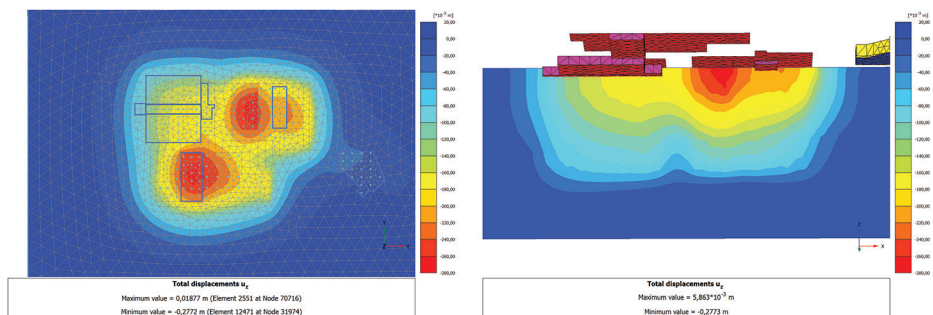
Slika 5. Prikaz najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 29,5$ cm na modelu 2 (lijevo) i najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 29,5$ cm na presjeku A-A modela 2 (desno)

5.1.3 Model 3 - UPOV Rijeka temeljeno na tlu ojačanim mlaznim injektiranjem (stupnjaci 7×7,5 m)

Pomoću Modela 3 je prikazano temeljenje objekata novog UPOV-a grada Rijeke na tlu ojačanom mlaznim injektiranjem u rasteru 7×7,5 metara do dubine 50 metara, slika 6. Ojačano tlo je simulirano stupnjacima na istome rasteru kao i piloti koji prolaze kroz sloj nabačaja. Prikaz najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 27,7$ cm na modelu 3 i najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 27,7$ cm na presjeku A-A modela 3 prikazano je na slici 7.



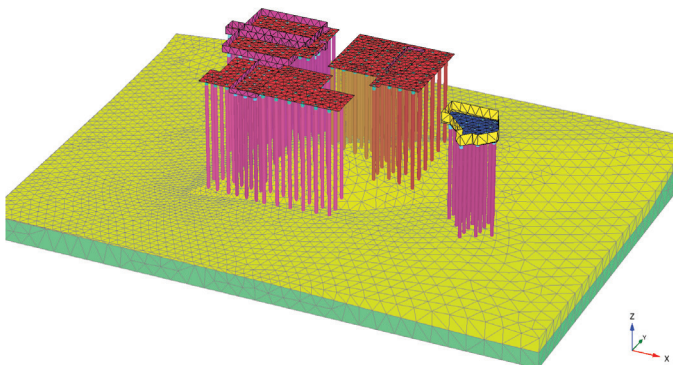
Slika 6 Prikaz generirane mreže za model 3



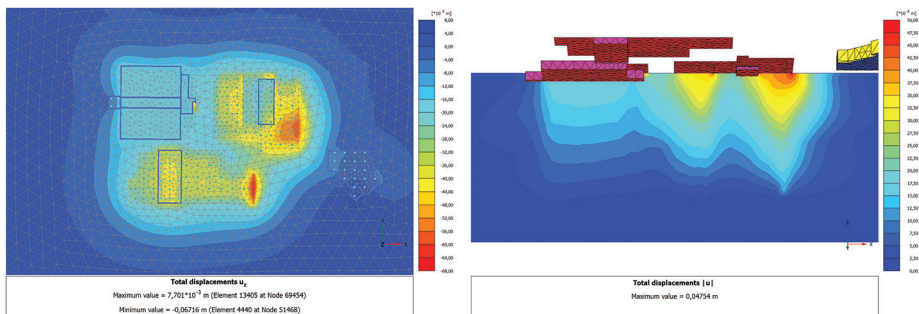
Slika 7 Prikaz najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 27,7$ cm na modelu 3 (lijevo) i najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 27,7$ cm na presjeku A-A modela 3 (desno)

5.1.4 Model 4 - UPOV Rijeka temeljeno na pilotima do dubine stijene

Modelom 4 je prikazano temeljenje objekata novog UPOV-a grada Rijeke na pilotima do dubine stijene od 61 do 80 metara, slika 8. Prikaz najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 6,72$ cm na modelu 4 i najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 4,75$ cm na presjeku A-A modela 4 prikazano je na slici 9.

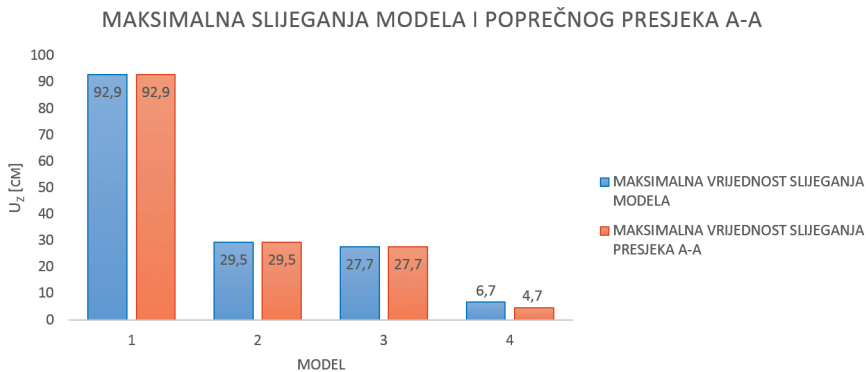


Slika 8. Prikaz generirane mreže za model 4



Slika 9. Prikaz najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 6,72$ cm na modelu 4 (lijevo) i najveće vrijednosti slijeganja $u_z = 4,75$ cm na presjeku A-A modela 4 (desno)

Sumarni prikaz rezultata slijeganja cijelog modela i slijeganja u presjeku za četiri slučaja temeljenja objekata budućeg UPOV-a grada Rijeke prikazan je na slici 10.



Slika 10. Prikaz najveće vrijednosti slijeganja cjelokupnog modela i poprečnog presjeka A-A

6 Zaključak

Provedbom numeričke analize u programu PLAXIS 3D na modelima 1 do 4 prikazano je kako varijacije u izvedbi dubokog temeljenja izvedbom pilota do dubine stijenske mase i ojačanja temeljnog tla mlaznim injektiranjem utječu na smanjenje slijeganja objekata novog UPOV-a grada Rijeke, u odnosu na varijantu kada su objekti temeljeni samo na temeljnim pločama. Iz tablice 1 je vidljivo kako temeljenje na pilotima do dubine stijenske podloge očekivano daje najmanje vrijednosti slijeganja. Međutim, zanimljivo je primijetiti veliku podudarnost u dobivenim vrijednostima slijeganja kod modela 2 i 3 u kojima je na različiti način modelirana izvedba ojačanja tla mlaznim injektiranjem na istom rasteru, unatoč činjenici da su ostvarena slijeganja prevelika. Kao optimalno rješenje problema temeljenja nameće se temeljenje na zabijanim čeličnim pilotima do dubine stijenske podloge te bi se daljnjim usavršavanjem modela, prilagođavajući raster pilota, dobile zadovoljavajuće vrijednosti ukupnog te naročito diferencijalnog slijeganja objekata novog UPOV-a grada Rijeke. Kako stvarne vrijednosti opterećenja, a pogotovo vrijednosti parametara temeljnog tla nisu potpuno definirane, rezultati dobiveni proračunima mogu se uzeti samo kao okvirne vrijednosti. Unatoč tome, dobiveni rezultati mogu poslužiti kao međusobna usporedba razine smanjenja deformabilnih značajki tla.

Budući da u trenutku izrade rada nije novi uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Rijeke nije još izveden, a nije poznata niti varijanta temeljenja koja će se na kraju izabrati, prema tome nije bilo moguće niti usporediti dobivena slijeganja s rezultatima koji će biti ostvareni na terenu.

Literatura

- [1] Bowles, J.: Foundation analysis and design, Fifth Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- [2] Antun Szavits-Nossan, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, Temeljenje – Uvod, https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Temeljenje_-_Uvod.pdf
- [3] Antun Szavits-Nossan, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, Temeljenje – Piloti, https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Temeljenje_-_Piloti3.pdf
- [4] Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M., Elson, K.: Piling Engineering, Third Edition, Taylor & Francis, 2009.
- [5] Gideon, G.: Design of Pile Foundations, Engineer Manual, US Army Corps of Engineers., 1991.
- [6] Čorko, D., Kovačić, D., Lovrenčić, D., Marić, B.: Mlazno injektiranje – prikaz tehnologije i primjene mlaznog injektiranja, Conex d.o.o., Zagreb, 1997.
- [7] Meho-Saša Kovačević, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, Ojačanje tla i stijena, 10. predavanje – Mlazno injektiranje, https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/OTS_-_10.pdf

Određivanje nedrenirane čvrstoće pomoću pokusa padajućeg šiljka

Luka Pušić¹, izv.prof.dr.sc. Danijela Jurić Kačunić²

¹ Centar Građevinskog fakulteta d.o.o., lpusic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, djk@grad.hr

Sažetak

Nedrenirana čvrstoća (eng. *undrained shear strength*) od velike je važnosti u grani geotehnike. Možemo ju definirati kao najveće posmično naprezanje u trenutku sloma tla, u uvjetima relativno brze promjene opterećenja, kod kojeg nije došlo do promjene vlažnosti tla. Cilj rada je uspostava veze između nedrenirane čvrstoće dobivene laboratorijskim ispitivanjem pokusom padajućeg šiljka (HRS CEN ISO/TS 17892-6) sa vrijednostima nedrenirane čvrstoće dobivenih iz izraza u korelaciji s indeksom tečenja i drugim laboratorijskim i terenskim ispitivanjima.

Ključne riječi: nedrenirana čvrstoća, pokus padajućeg šiljka, indeks tečenja

Determination of undrained shear strength using fall-cone device

Abstract

The undrained shear strength is of great importance in the field of geotechnics. It can be defined as the greatest torsional stress at the moment of soil breakdown, under relatively rapid load change conditions, when no change in soil moisture occurs. The aim of the paper is to establish the link between the undrained shear strength obtained by the laboratory fall cone test (HRS CEN ISO / TS 17892-6) and the values of undrained shear strength obtained from the expression, in correlation with the liquidity index and other laboratory and field tests.

Key words: undrained shear strength, fall cone test, liquidity index

1 Uvod

Nedrenirana čvrstoća tla (eng. undrained shear strength, c_u) definirana je kao najveće posmično naprezanje u trenutku sloma tla, u uvjetima relativno brze promjene opterećenja, kod kojeg nije došlo do promjene vlažnosti tla. Takvi uvjeti se često pojavljuju kod izvedbe standardnih geotehničkih zahvata u sitnozrnim tlima male propusnosti, kod kojih ne može doći do značajne promjene količine vode u porama tla. Nedrenirana čvrstoća se određuje raznim laboratorijskim (pokus padajućeg šiljka, pokus jednoosnog tlaka, nekonsolidirani nedrenirani troosni pokus) i terenskim ispitivanjima (krilna sonda, CPT). Tablica 1. prikazuje klasifikaciju tla prema vrijednostima nedrenirane čvrstoće prema HRN EN ISO 14688-2. Iz tablice je vidljivo kako se vrijednosti nedrenirane čvrstoće sitnozrnih tala kreću od ekstremno niskih (< 10 kPa) do ekstremno visokih (> 300 kPa).

Tablica 1. Vrijednosti nedrenirane čvrstoće sitnozrnih tala prema HRN EN ISO 14688-2

Nedrenirana čvrstoća	c_u [kPa]
Ekstremno niska	< 10
Vrlo niska	10 - 20
Niska	20 - 40
Srednja	40 - 75
Visoka	75 - 100
Vrlo visoka	150 - 300
Ekstremno visoka	> 300

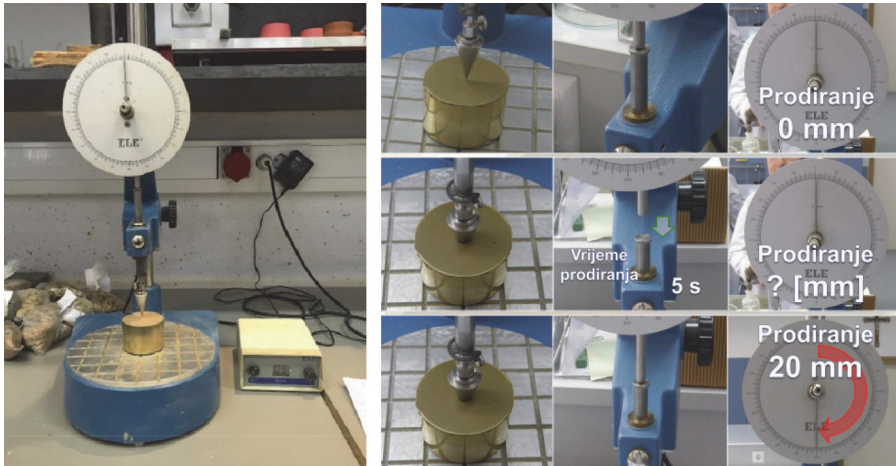
Materijali koji imaju posmičnu čvrstoću veću od 300 kPa ponašaju se kao slabije stijene i prema HRN EN ISO 14688-2 trebali bi se opisivati kao stijene.

Pokus padajućeg šiljka (slika 1.) je osmišljen za određivanje čvrstoće potpuno kohezivnih tala Skandinaviji (Swedish State Railways, 1922.). Prvo značajnije istraživanje određivanja nedrenirane čvrstoće tla pokusom padajućeg šiljka proveo je Hensbo (1957.). Zaključio je da je nedrenirana čvrstoća tla proporcionalna težini šiljka i obrnuto proporcionalna kvadratu dubine prodiranja šiljka. Hensbo je razvio izraz za nedreniranu čvrstoću na temelju numeričkih i eksperimentalnih analiza:

$$c_u = c \frac{mg}{i^2} \quad (1)$$

gdje je:

- c – konstanta šiljka
- m – masa šiljka
- g – ubrzanje gravitacije
- i – dubina prodiranja šiljka.



Slika 1. Pokus padajućeg šiljka

Tijekom povijesti mnogi su znanstvenici pokušali definirati vrijednost konstante šiljka za šiljke od 30° i 60°. Hansbo je definirao da je konstanta šiljka za neporemećeno tlo za šiljak s kutom od 30° između 0.8 i 1.0, a za šiljak s kutom od 60° između 0.2 i 0.25. Karlson je dobio vrijednosti konstante za šiljak s kutom od 30° između 0.7 i 0.86, te za šiljak pod kutom od 60° između 0.25 i 0.35. Wood je nakon eksperimenata na neporemećenim uzorcima zaključio da su vrijednosti konstante šiljka s kutom od 30° 0.85 i za šiljak s kutom od 60° 0.29. Takve vrijednosti se i danas koriste. Mnogi znanstvenici su svojim ispitivanjima došli do izraza za nedreniranu čvrstoću u korelaciji s indeksom tečenja. Indeks tečenja predstavlja mjeru konzistencije tla i čvrstoće tla pri određenoj vlažnosti:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = 1 - I_c \quad (2)$$

gdje je:

- w - vlažnost tla [%]
- w_p - granica plastičnosti [%]
- w_L - granica tečenja [%]
- I_c - indeks konzistencije.

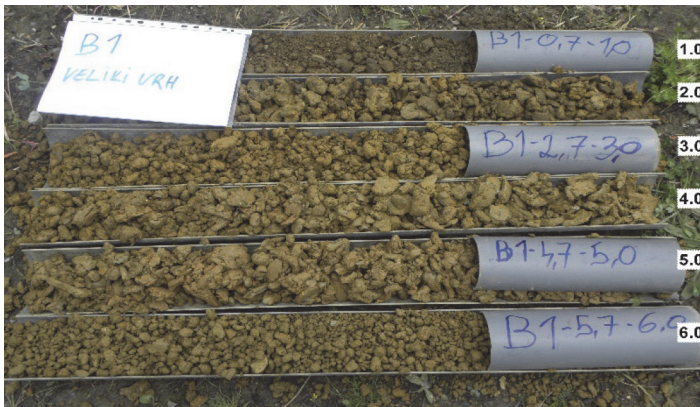
U tablici 2. prikazani su dobiveni izrazi navedenih autora za određivanje vrijednosti nedrenirane čvrstoće u korelaciji s indeksom tečenja.

Tablica 2. Izrazi za određivanje vrijednosti nedrenirane čvrstoće u korelaciji sa indeksom tečenja [3]

Autori	Izrazi
Wroth i Wood (1978.)	$c_u = 170 \exp(-4,61 I_t)$ (3)
Hirata i ostali (1990.)	$c_u = 100 \exp(-3,361 I_t + 0,376)$ (4)
Yilmaz (2000.)	$c_u = 100 \exp(0,026 - 1,21 I_t)$ (5)
Koumoto i Houlsby (2001.)	$c_u = \exp[(1,070 - I_{LN})/0,217]$ (6)
NGI (2002.)	$c_u = 163,7 \exp(-3,915 I_t)$ (7)
NGI (2002.)	$c_u = 210,3 \exp(-4,413 I_t)$ (7)
Yang i ostali (2006.)	$c_u = 159,6 \exp(-3,971 I_t)$ (8)

2 Eksperimentalni rad

Promatrano istraživano područje nalazi se na južnim padinama planine Medvednice, u području Markuševca, na nadmorskim visinama oko 300 m. Napravljeno je 10 bušotina s ukupno 23 uzorka, i to 6 bušotina s 15 uzoraka s lokacije Veliki Vrh i 4 bušotine s 8 uzoraka s lokacije Kršišće (slika 2. i tablica 3.).



Slika 2. Prikaz uzoraka izvađenih iz istražne bušotine B1 na lokaciji Veliki Vrh

Tablica 3. Prikaz rezultata ispitivanja po bušotinama s lokacije Veliki vrh

Sonda	Dubina [m]	w ₀ [%]	w _L [%]	w _P [%]	I _P [%]	I _C [%]	I _L [%]	I _{LW} [%]	Prodiranje šiljka [mm]	Nedrenirana čvrstoća c _u [kPa]	Simbol
B 1	0,7-1,0	19,74	51,42	17,58	33,84	0,94	0,06	0,11	1,50	279,04	CH
	2,7-3,0	21,26	55,94	16,07	39,87	0,87	0,13	0,22	2,50	100,45	CH
	4,7-5,0	25,42	77,67	18,20	59,46	0,87	0,12	0,23	2,45	104,60	CH
	5,7-6,0	20,07	62,92	18,19	44,73	0,96	0,04	0,08	0,40	3924,00	CH
B 2	1,7-2,0	28,93	42,67	18,18	24,49	0,56	0,44	0,54	5,10	24,14	CH
	3,7-4,0	27,32	82,68	25,27	57,42	0,96	0,04	0,07	2,50	100,45	CH
	5,7-6,0	30,10	90,20	21,64	30,10	0,88	0,12	0,23	2,20	129,72	CH
B3	1,7-2,0	24,46	63,61	19,16	44,45	0,88	0,12	0,20	0,90	775,11	CH
	3,7-4,0	25,17	60,32	18,32	42,01	0,84	0,16	0,27	2,30	118,68	CH
	5,7-6,0	42,53	85,81	28,52	57,29	0,76	0,24	0,36	3,20	61,31	CH
B4	2,0-2,4	30,08	68,48	27,34	41,14	0,93	0,07	0,10	1,20	436,00	CH
	5,5-6,0	26,55	52,24	24,80	27,45	0,94	0,06	0,09	1,30	371,50	CH
B5	2,0-2,6	32,67	66,83	26,15	40,68	0,84	0,16	0,24	2,90	74,65	CH
	5,5-6,0	30,02	60,72	25,41	35,31	0,87	0,13	0,19	0,70	1281,31	CH
B6	2,0-2,6	28,70	54,02	37,39	26,64	0,95	0,05	0,07	1,60	245,25	CH

Tablica 4. Prikaz rezultata ispitivanja po bušotinama s lokacije Kršišće

Sonda	Dubina [m]	w ₀ [%]	w _L [%]	w _P [%]	I _P [%]	I _C [%]	IL [%]	ILN [%]	Prodiranje šiljka [mm]	Nedrenirana čvrstoća [kPa]	Simbol
B 1	6,0-6,5	35,17	57,87	35,51	22,36	1,02	-0,02	-0,02	1,20	436,00	MH
	7,5-8,0	28,04	48,89	24,46	24,46	0,85	0,15	0,20	2,70	86,12	CL
B 2	2,5-3,0	27,34	51,50	20,38	31,12	0,78	0,22	0,32	1,80	193,78	CH
	5,5-6,0	37,76	55,99	27,09	28,90	0,63	0,37	0,46	3,80	43,48	CH
	7,5-8,0	30,04	50,20	30,42	19,78	1,02	-0,02	-0,03	1,90	173,92	MH
B3	5,5-6,0	27,26	49,83	27,18	22,65	0,99	0,00	0,01	1,60	245,25	CL
	7,5-8,0	29,71	56,88	27,56	29,32	0,93	0,07	0,10	1,60	245,25	CH
B4	4,5-5,0	28,43	58,93	25,22	33,71	0,90	0,10	0,14	1,90	173,92	CH

Vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivene pokusom padajućeg šiljka su uspoređene s vrijednostima nedrenirane čvrstoće dobivene izrazima u korelaciji s indeksom tečenja. Vidljivo je da postoje određena odstupanja od vrijednosti dobivenih izrazima u korelaciji s indeksom tečenja. Razlog odstupanja možemo tražiti u osjetljivosti uređaja te neiskustvu vršitelja pokusa.

Tablica 5. Prikaz vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka na uzorcima s lokacije Veliki Vrh i usporedba s izrazima za dobivanje nedrenirane čvrstoće u korelaciji s indeksom tečenja

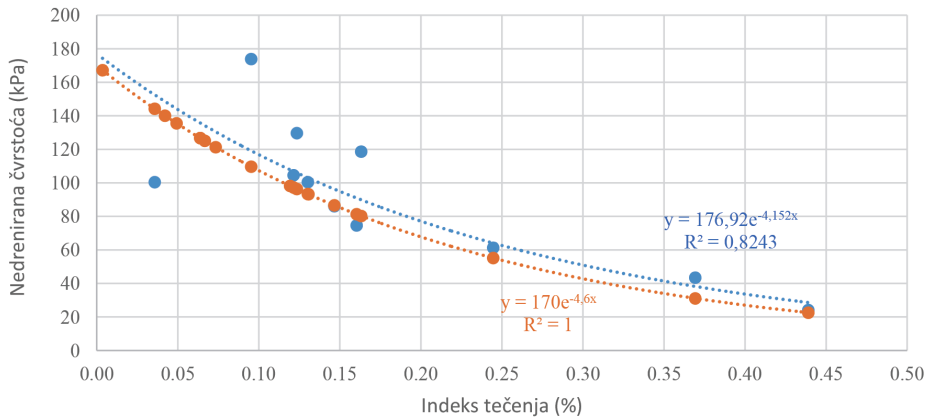
Sonda	Dubina [m]	c_u [kPa]	Wroth i Wood (1978.) [kPa]	Hirata i ostali (1990.) [kPa]	Yilmaz (2000.) [kPa]	Koumoto i Houslsby (2001.) [kPa]	NGI (2002.) [kPa]	NGI (2002.) [kPa]	Yang i ostali (2006.) [kPa]
B 1	0,7-1,0	279,04	126,75	117,52	95,01	84,21	127,50	161,43	123,87
	2,7-3,0	100,45	93,41	94,03	87,68	49,25	98,34	122,64	95,19
	4,7-5,0	104,6	97,25	96,85	88,61	47,93	101,77	127,17	98,56
	5,7-6,0	3924,00	140,11	126,46	97,55	96,12	138,86	176,69	135,07
B 2	1,7-2,0	24,14	22,57	33,31	60,34	11,26	29,36	34,12	27,94
	3,7-4,0	100,45	144,25	129,17	98,29	102,27	142,34	181,38	138,51
	5,7-6,0	129,72	96,37	96,20	88,40	47,73	100,98	126,13	97,79
B 3	1,7-2,0	775,11	98,23	97,56	88,85	54,22	102,64	128,32	99,42
	3,7-4,0	118,68	80,28	84,18	84,25	40,55	86,45	107,00	83,53
	5,7-6,0	61,31	55,2	64,02	76,35	26,03	62,84	76,35	60,45
B 4	2,0-2,4	436	125,14	116,43	94,69	85,76	126,13	159,59	122,52
	5,5-6,0	371,5	126,78	117,54	95,01	90,84	127,53	161,47	123,9
B 5	2,0-2,6	75,65	81,33	84,99	84,54	46,41	87,41	108,26	84,47
	5,5-6,0	1281,31	93,25	93,91	87,64	57,34	98,19	122,44	95,05
B 6	2,0-2,4	245,25	133,57	123,45	96,7	100,87	135,02	171,53	131,29

Tablica 6. Prikaz vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka na uzorcima s lokacije Kršiče i usporedba s izrazima za dobivanje nedrenirane čvrstoće u korelaciji s indeksom tečenja

Sonda	Dubina [m]	c_u [kPa]	Wroth i Wood (1978.) [kPa]	Hirata i ostali (1990.) [kPa]	Yilmaz (2000.) [kPa]	Koumoto i Houslsby (2001.) [kPa]	NGI (2002.) [kPa]	NGI (2002.) [kPa]	Yang i ostali (2006.) [kPa]
B 1	6,0-6,5	436	186,38	155,77	105,15	151,66	177,03	228,47	172,79
	7,5-8,0	86,12	86,64	89,00	85,96	55,81	92,23	114,60	89,20
B 2	2,5-3,0	193,78	60,76	68,68	78,30	32,15	68,20	83,26	65,68
	5,5-6,0	43,48	31,11	42,11	65,66	16,83	38,57	45,56	36,85
	7,5-8,0	173,92	186,38	155,77	105,15	155,48	177,03	228,47	172,79
B 3	5,5-6,0	245,25	167,26	143,93	102,20	135,44	161,45	207,25	157,38
	7,5-8,0	245,25	121,33	113,83	93,92	85,90	122,85	155,20	119,29
B 4	4,5-5,0	173,92	109,70	105,75	91,46	72,27	112,76	141,74	109,36

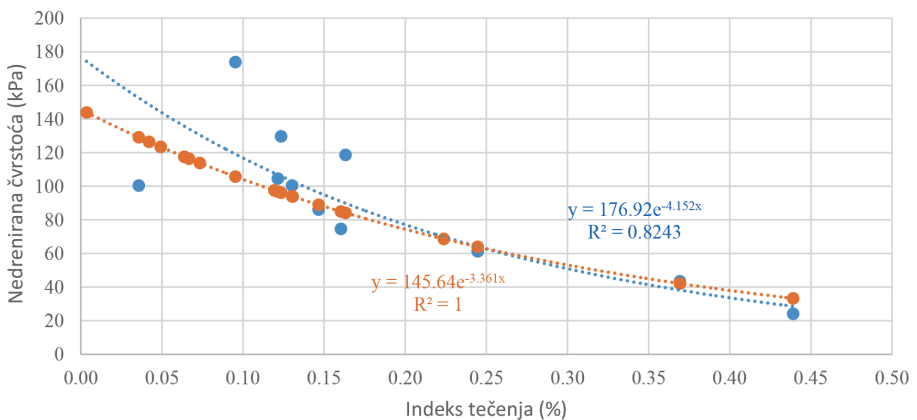
Uzimajući u obzir mogućnost pogreške, ako se iz tablica 5. i 6. odbace vrijednosti koje pokazuju velika odstupanja u vrijednostima nedrenirane čvrstoće u odnosu na vrijednosti nedrenirane čvrstoće sitnozrnih tala prema HRN EN ISO 14688-2 (tablica 1.), dobivaju se zadovoljavajući rezultati.

Slika 3. pokazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (Wroth i Wood, 1978.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



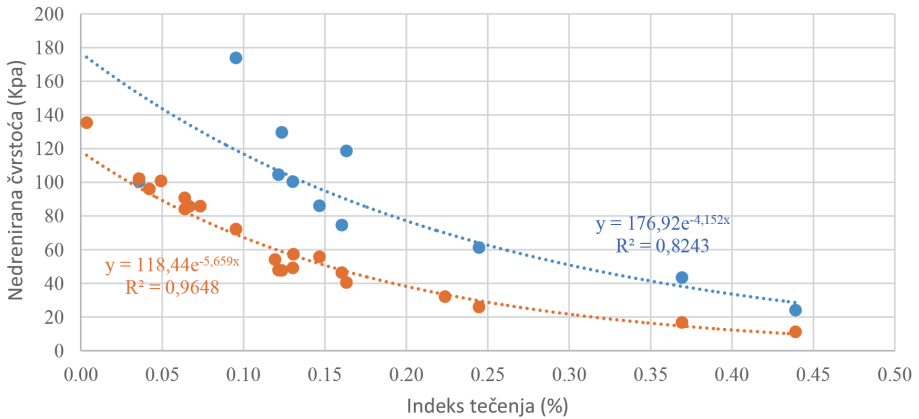
Slika 3. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [5]

Slika 4. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja Hirata i ostali (1990.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



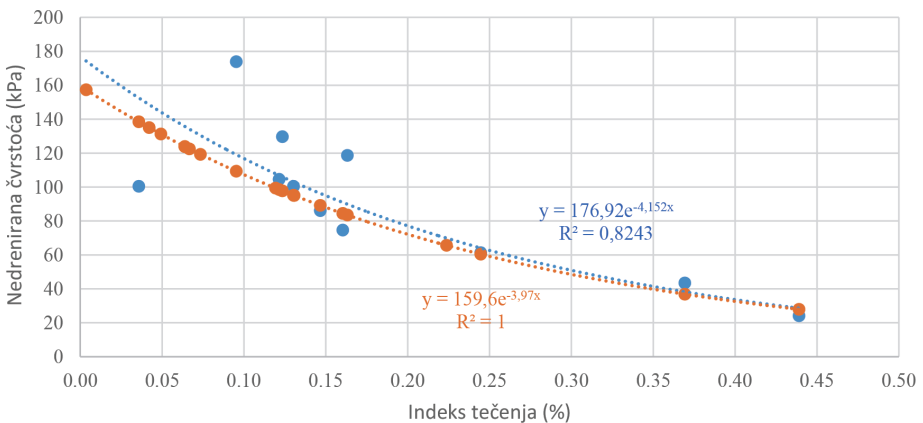
Slika 4. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [2]

Slika 5. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (Koumoto i Houslsby, 1990.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



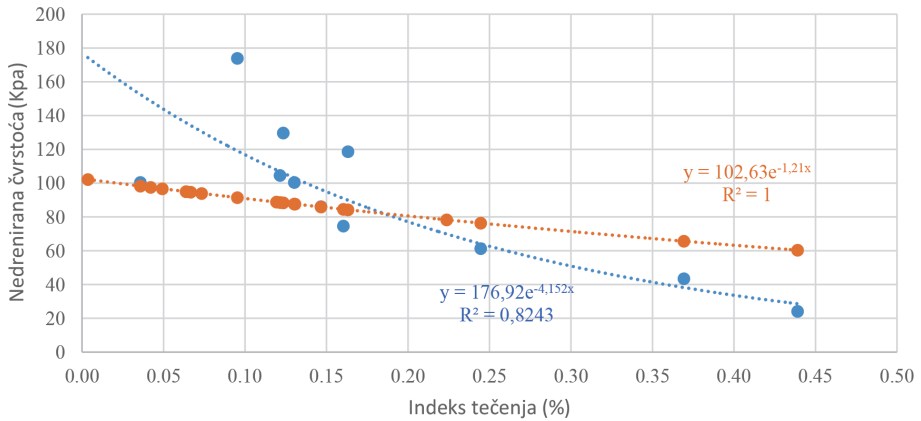
Slika 5. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [3]

Slika 6. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (Yang i ostali, 2006.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



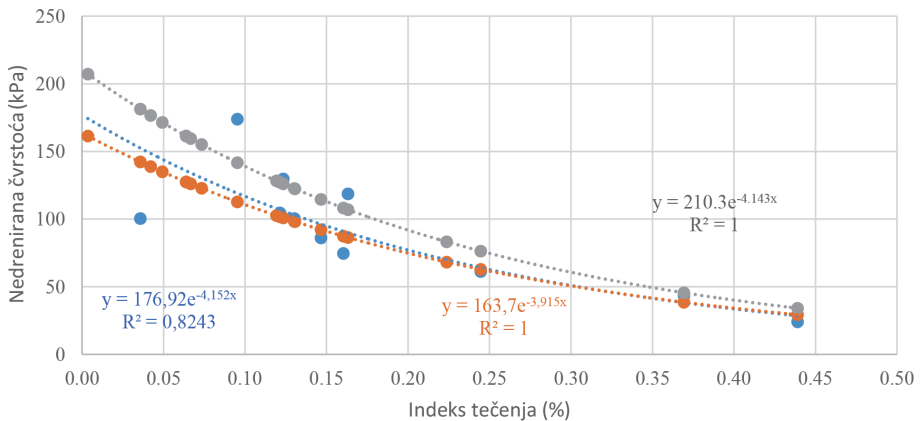
Slika 6. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [6]

Slika 7. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (Yilmaz, 2000.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



Slika 7. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [7]

Slika 8. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (NGI, 2002.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



Slika 8. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [4]

Na osnovi rezultata može se zaključiti da najpreciznije rezultate za izračun nedrenirane čvrstoće na lokacijama Veliki Vrh i Kršišće daje izraz prema NGI s odstupanjem od 64,13 kPa.

3 Zaključak

Cilj rada je usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivene pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima dobivenim preko korelacija s indeksom tečenja. U radu se pokazalo da postoji određeni broj uzoraka koji su se zbog velikog odstupanja rezultata dobivenih nedreniranih čvrstoća morali odbaciti (odbačeno je 9 od 25 uzoraka). Razlog velikog odstupanja kod nekih uzoraka možemo tražiti u neiskustvu ispitivača ili osjetljivosti uređaja. Za bolje i preciznije rezultate bilo bi preporučljivo koristiti ostale metode za određivanje nedrenirane čvrstoće kao što su krilna sonda, pokus jednoosnog tlaka, nekonsolidirani nedrenirani troosni pokus, CPT. To ujedno može biti daljnji smjer istraživanja. Najbolje rezultate za područje ispitivanja pokazale su vrijednosti dobivene prema izrazu NGI, a najlošije rezultate pokazale su vrijednosti dobivene prema izrazu Koumotoa i Houlsbya.

Literatura

- [1] Jurić Kačunić, D.: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, Geotehnički laboratorij, 10. predavanje – Nedrenirana čvrstoća
- [2] Hirata, S., Yao, S., Nishida, K.: Multiple regression analysis between the mechanical and physical properties of cohesive soils. *Soils and Foundations*, 10 (1990) 3, pp. 91-108.
- [3] Koumoto, T., Houlsby, G.T.: Theory and practice of the fall cone test., *Geotechnique*, 51 (2001) 8, pp. 701-712.
- [4] NGI: Early soil investigations for Fast track projects. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Report 521553, 2002.
- [5] Wroth, C.P., Wood, D.M.: The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (1978) 2, pp. 137-145.
- [6] Yang, S.L., Kvalstad, T., Forsberg, C.F.: Parameter studies of sediment in the Storegga Slide region, *Geo-Marine Letters*, 26 (2006) 4, pp. 213-224.
- [7] Yilmaz, I.: Evaluation of shear strength of clayed soils by using their liquidity index, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59 (2000) 3, pp. 227-229.
- [8] Hrvatski zavod za norme, Geotehničko istraživanje i ispitivanje -- Identifikacija i klasifikacija tla -- 2. dio: Načela klasifikacije (ISO 14688-2:2004; EN ISO 14688-2:2004), 2004.

Statističke metode u geotehnici

Nicola Rossi¹, prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, nrossi@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, msk@grad.hr

Sažetak

U geotehničkoj praksi se još uvijek često provode isključivo determinističke analize zbog većeg iskustva u njihovoj primjeni i determinističkom određivanju parametara modela. Suprotnost njima su statističke metode kojima se nastoji kvantificirati varijabilnost i nepouzdanost pojedinih varijabli. Budući da se geotehnika bavi upravo takvim materijalima, pogoduje primjeni statistike koja se sve više koristi praksi. Kao i determinističke metode, tako i statističke imaju određene nedostatke kada se primjenjuju same ili prevladavaju u analizama. Zbog toga bi jednakomjerno sudjelovanje obiju metoda u analizama rezultiralo optimalnim rezultatima. U radu je dan pregled nekih od najkorištenijih statističkih metoda u geotehničkoj praksi.

Cljučne riječi: statističke metode, geotehnika, analiza pouzdanosti

Statistical methods in geotechnics

Abstract

Deterministic analyses are still often used in geotechnical engineering because great experience in their use, and in selection of deterministic model parameters, has so far been acquired. Their opposites are statistical methods the aim of which is to quantify variability and uncertainty of various variables. Since geotechnics studies precisely such materials, it favours the use of statistics that is increasingly used in practice. Just like deterministic methods, statistical methods also have their shortcomings when used by themselves or when prevailing in analyses. That is why an equal participation of the two methods in analyses would yield optimum results. An overview of some statistical methods that are most commonly used in geotechnical engineering is also provided in the paper.

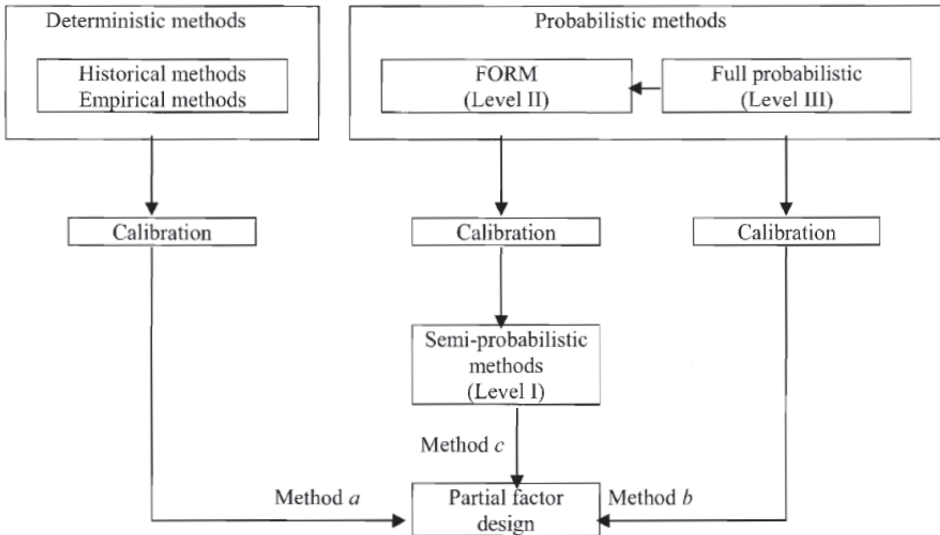
Key words: probabilistic methods, geotechnical engineering, reliability analysis

1 Uvod

Geotehnika je grana građevine koja se bavi materijalima s izrazitom razinom nesigurnosti u smislu parametara koji ih opisuju. U praksi je često potrebno predvidjeti ponašanje velikog volumena tla ili stijene iz često vrlo ograničenog broja pokusa na malim uzorcima, čime se dobivaju grubo aproksimirani modeli tla zbog nepoznate stratigrafije i parametara tih materijala. Osim toga, uz varijabilnost parametara materijala zbog heterogenosti, zbog poteškoća u dopremi neporemećenog uzorka u laboratorij, pripremi relevantnog uzorka za ispitivanje te često nedostupnih sofisticiranijih ispitivanja, pogreške se mogu dogoditi u cijelom procesu od istražnih radova do završetka provođenja pokusa. Stoga konačni rezultati mogu i među uzorcima istog tla znatno varirati. Usprkos svemu tome, u geotehničkom inženjerstvu se još uvijek vrlo često primjenjuje deterministički pristup za odabir relevantnih parametara materijala te provedbe analiza. Takav pristup se odnosi na odabir konzervativnih vrijednosti parametara materijala koje, zbog mogućih nesigurnosti, treba dodatno umanjiti primjenom parcijalnih faktora prema Eurokodu 7, za različite proračunske pristupe. Na taj se način postiže određena razina sigurnosti koja je, čak i u slučaju predimenzioniranja konstrukcija, opravdana zbog nesigurnosti povezanih s tlom i stijenom. S ciljem optimizacije rješenja, odnosno projektiranja isplativijih konstrukcija uz zadovoljavajuću razinu sigurnosti, moguća je primjena statističkih metoda. Upravo spomenuta varijabilnost parametara i nesigurnosti u dobivene rezultate uvelike pogoduju primjeni statističkih metoda za njihovu analizu. Dakle, cilj analiza pouzdanosti (eng. *reliability design*) jeste osigurati zadovoljavajuće ponašanje projektiranog sustava unutar granica ekonomičnosti [1].

Parcijalni faktori za djelovanja, otpornosti ili parametre materijala dobivaju se na više načina. Osnovna razlika je da je jedan pristup deterministički, a drugi probabilistički. Deterministički pristup određivanja parcijalnih faktora bazira se na povijesnom i empirijskom pristupu, a probabilistički bazira na statističkim metodama (slika 1.). Parcijalni faktori definirani Eurokodom dobiveni su prije svega primjenom determinističkog pristupa [2].

Iako je faktor sigurnosti moguće dobiti i statističkim metodama, takav faktor vrijedi samo za specifičnu proračunsku situaciju za koju je izveden. Dakle, faktor sigurnosti primjerice od 1,5 ne daje dosljednu razinu pouzdanosti pri korištenju u različitim slučajevima. S druge strane, statističkim metodama je moguće definirati traženu razinu pouzdanosti koju želimo uvijek postići te pomoću nje izvesti potrebnu otpornost da bi se ona postigla [1]. U ovom radu je dan pregled nekih od statističkih metoda koje se koriste u geotehničkoj praksi, s ciljem uzimanja u obzir varijabilnosti parametara materijala u proračunima.



Slika 1. Metode izračuna parcijalnih faktora sigurnosti [2]

2 Prednosti i nedostaci statističkih metoda

Statističkim metodama moguće je definirati traženu razinu pouzdanosti koja ostaje konzistentna pri različitim proračunskim situacijama, gdje bi jedinstveni faktor sigurnosti davao dvije različite vrijednosti pouzdanosti. U proračune je preporučeno, osim čisto statističkih metoda, primijeniti i prethodna iskustva na sličnim zahvatima. U slučaju da se gradi konstrukcija bez prethodnih iskustava, ili u slučaju da iskustva nisu dobra, statističkim metodama moći će se i dalje provesti analize s izračunom razine pouzdanosti, dok empirijski pristup neće biti moguć [1].

S druge strane kod statističkih metoda postoji potreba za definiranjem određenih statističkih parametara svake varijable koja ulazi u proračun, iako zbog malog broja dostupnih podataka često nisu poznati. U tom se slučaju mogu jedino pretpostaviti na temelju prethodnih iskustava ili aproksimirati iz dostupnih podataka.

Kako sume slučajnih varijabli, prema središnjem graničnom teoremu, naginju prema normalnoj raspodjeli, ona se može koristiti za aproksimaciju velikog broja pojava u prirodi, što se odnosi i na parametre tla, opterećenja, otpornosti itd. [3, 4]. Provođenje statističkih analiza također zahtijeva jača računala koja moraju biti u stanju provesti tisuće do stotine tisuća analiza, što je mnogo zahtjevnije od determinističkog rješavanja istog problema.

3 Osnovna terminologija

U ovom su poglavlju dani opisi nekih pojmova vezanih za statistiku, a koji se ovdje upotrebljavaju. Svaki događaj ili parametar s čijom vrijednosti postoji određena razina nesigurnosti, potrebno je zadati na adekvatan način. To se postiže slučajnim varijablama (eng. *random variable*) kao funkcijama koje opisuju tu varijaciju, u potpunosti određenima svojom slikom i raspodjelom. U slučaju da su vrijednosti dviju slučajnih varijabli ovisne jedna o drugoj, ovisnost se opisuje pomoću koeficijenta korelacije. Koeficijent korelacije (eng. *coefficient of correlation*) je stoga mjera linearne ovisnosti između dviju slučajnih varijabli. Može poprimiti vrijednosti u rasponu od $[-1,1]$, gdje vrijednost 0 označava odsutnost linearne ovisnosti, a 1 i -1 postojanje jake linearne ovisnosti među varijablama. Pri tome negativne vrijednosti razumijevaju rast vrijednosti jednog parametra s padom drugog, a pozitivne rast vrijednosti jednog s rastom drugog parametra. Kada se više slučajnih varijabli poveže u jednu funkciju, dobiva se funkcija slučajnih varijabli koja se, ako opisuje granično stanje nekog događaja, naziva funkcija graničnog stanja (eng. *limit state function*). Dakle, takva funkcija kao argumente prima slučajne varijable koje definiraju kriterij stabilnosti određenog zahvata, a označava se sa $g(x) = y$. Funkcija je definirana na način da $y > 0$ označava zadovoljavajuće ponašanje/ishode, a $y < 0$ nezadovoljavajuće.

Za opisivanje rasapa distribucije vjerojatnosti mogu se upotrijebiti različiti parametri, među kojima je koeficijent varijacije (eng. *coefficient of variability - cov*), bezdimenzijski parametar definiran jednadžbom (1).

Indeks pouzdanosti (eng. *reliability index*) je koeficijent koji može poslužiti za ocjenu pouzdanosti problema na sličan način kao što to radi deterministički faktor sigurnosti. U većini slučajeva očekivane i zahtijevane vjerojatnosti otkazivanja poprimaju vrlo male vrijednosti (npr. 10^{-5}), što može otežati interpretaciju rezultata. S obzirom na to da postoji veza između indeksa pouzdanosti i vjerojatnosti otkazivanja, indeksom pouzdanosti je moguće prikazati rezultate na razumljiviji način. Originalni izraz indeksa pouzdanosti dan je jednadžbom (2).

$$cov = \frac{\sigma_x}{|\mu_x|} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\mu_x}{\sigma_x} \quad (2)$$

gdje su:

σ_x - standardna devijacija slučajne varijable X

μ_x - očekivana vrijednost slučajne varijable X

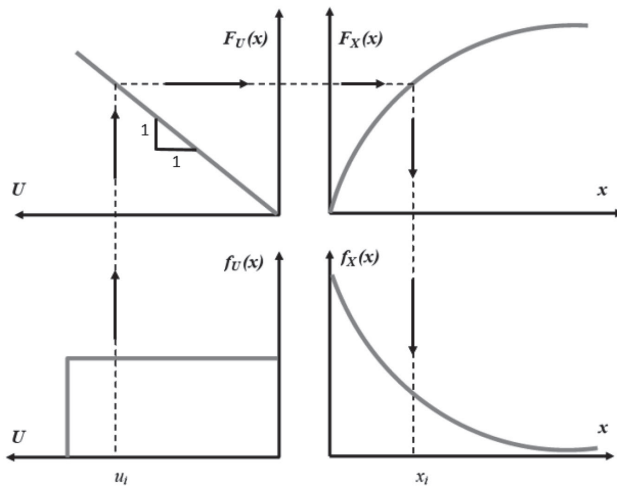
cov - koeficijent varijacije

β - indeks pouzdanosti.

4 Statističke metode

4.1 Monte Carlo Simulation (MCS) i Latin Hypercube Sampling (LHS)

Monte Carlo metoda zasniva se na slučajnom odabiru velikog broja mogućih vrijednosti parametara na temelju definiranih distribucija vjerojatnosti za svaki od njih. Prije analize je potrebno definirati kriterij graničnog stanja kojim se, za svaku vrijednost ili skup vrijednosti, determinističkim pristupom provjerava zadovoljava li konstrukcija uvjete stabilnosti. Procedura za provođenje analiza Monte Carlo metodom razumijeva odabir distribucije vjerojatnosti slučajnih varijabli, definiranje granica uzorkovanja varijabli, te provođenja velikog broja analiza sa slučajno odabranim vrijednostima [5]. Kako bi se uzela u obzir međusobna ovisnost nekih parametara materijala zbog realnijeg odabira slučajnih uzoraka, koristi se koeficijent korelacije. Slučajno odabrani broj druge varijable se korigira prema tom koeficijentu nakon odabira vrijednosti prve varijable. Uzorkovanje se izvodi tako da se nasumice odabere broj (u_i) na intervalu $[0,1]$ s uniformnom distribucijom, koji odgovara vjerojatnosti da će slučajna varijabla poprimiti vrijednosti manje od nekog broja (x_i), ovisno o kumulativnoj distribuciji slučajne varijable. Dakle, inverznom funkcijom se pronalazi vrijednost slučajne varijable (x_i) za koju vrijedi $u_i = P[X \leq x_i]$. Postupak je grafički prikazan na slici 2. Na kraju se vjerojatnost otkazivanja definira kao omjer broja analiza koje su dale nezadovoljavajući rezultat i ukupnog broja provedenih analiza.



Slika 2. Grafički prikaz određivanja vrijednosti slučajne varijable ovisno o slučajnom broju i kumulativnoj distribuciji [5] $f_U(x)$, $f_X(x)$ - distribucije vjerojatnosti slučajnih varijabli U i X ; $F_U(x)$, $F_X(x)$ - funkcije kumulativne distribucije slučajnih varijabli U i X ; u_i , x_i - vrijednosti slučajnih varijabli U i X

Razina pouzdanosti metode raste s brojem uzorkovanja, a s porastom broja uzorkovanja raste zahtjevnost i vrijeme proračuna. Broj potrebnih simulacija također raste s porastom zahtijevane razine pouzdanosti same metode, porastom broja slučajnih varijabli te smanjenjem očekivane vjerojatnosti otkazivanja. Zbog toga je ova metoda praktično primjenjiva za rješavanje jednostavnijih problema. Budući da broj ponavljanja ovisi o različitim parametrima te utječe na zahtjevnost proračuna, jednadžbama (3) i (4) može se okvirno izračunati broj potrebnih simulacija za određeni problem. Statistički je izvedena jednadžba (3) koja povezuje broj potrebnih ponavljanja sa zahtijevanom razinom pouzdanosti, standardnom devijacijom koja pripada toj razini pouzdanosti te brojem slučajnih varijabli [6].

$$N_{mc} = \left[\frac{d^2}{4 \cdot (1 - \varepsilon)^2} \right]^m \quad (3)$$

gdje su:

N_{mc} - broj Monte Carlo simulacija

ε - zahtijevana razina pouzdanosti (0-100 %) u decimalnom obliku

d - standardna normalna devijacija za određenu razinu pouzdanosti; prema Čebiševljevoj nejednakosti

m - broj slučajnih varijabli.

Još jedna jednadžba po kojoj se može pretpostaviti broj simulacija je izraz (4), prema [7]:

$$N_{mc} = \left(\frac{d}{\alpha} \right)^2 \cdot \frac{1-P}{P} \quad (4)$$

gdje su:

N_{mc} - broj Monte Carlo simulacija

α - prihvatljiva greška (1- ε)

d - standardna normalna devijacija za određenu razinu pouzdanosti

P - vjerojatnost otkazivanja (pretpostavka).

Kako bi se odstranili problemi s potrebnim velikim brojem ponavljanja, odnosno umanjila zahtjevnost metode i povećala pouzdanost za isti broj ponavljanja, razvijene su razne metode koje optimiziraju uzorkovanje Monte Carlo simulacije, među kojima je i Latin Hypercube. LHS predstavlja metodu uzorkovanja s multivarijantnom distribucijom slučajnih varijabli koje imaju neku međusobnu ovisnost. Odabir uzorka se izvodi na način da se distribucija svake varijable podijeli na n intervala jed-

nakih vjerojatnosti (broj intervala mora biti jednak za svaku varijablu). Zatim se na svakom intervalu bira uzorak takav da on jedini leži u svojoj hiperravnini poravnatoj s koordinatnim osima. Dakle svaki uzorak se bira pamteći sve prethodno odabrane uzorke, čime se optimizira uzorkovanje što znatno ubrzava i smanjuje zahtjevnost simulacija.

4.2 Metoda Point Estimate (PE)

Koristi se za numeričku aproksimaciju prvog, drugog i trećeg momenta funkcija slučajnih varijabli, pomoću funkcije graničnog stanja i momenata pojedinih slučajnih varijabli. Ideja je da se kontinuirane slučajne varijable aproksimiraju ekvivalentnim diskretnim varijablama s istim vrijednostima momenata. Tako se procjenjuju lokacije točaka najpovoljnijih za provođenje numeričke integracije funkcije, tzv. Gaussove točke integracije, metodama Gaussove kvadrature. Ova je metoda stoga primjena Gaussove kvadrature u svrhe određivanja momenata slučajne funkcije. U većini slučajeva proračun se provodi u dvije točke. Za slučaj dvije ili više varijabli pretpostavlja se da su njihove distribucije simetrične te one mogu ili ne moraju biti u međusobnoj ovisnosti (koeficijent korelacije). Svaka slučajna varijabla se normalizira čime se ostvaruje srednja vrijednost u ishodištu koordinatnog sustava. Kada se odrede po dvije točke svake distribucije, odredi se 2^n točaka (n je broj varijabli) koje se nalaze na svakoj mogućoj kombinaciji prethodno određenih točaka. Izraz (5) daje očekivanu vrijednost funkcije Y na potenciju m (momenti funkcije graničnog stanja), pri čemu su: P - težinski koeficijenti koji ovise o točkama u kojima se evaluira podintegralna funkcija; y_i - vrijednost funkcije Y u točki x_i .

$$E[Y^m] \approx \sum P_i \cdot y_i^m \quad (5)$$

Nedostatak metode je taj da će, ako bude veći broj slučajnih varijabli, broj točaka integracije postati prevelik za praktične svrhe. Napravljene su razne modifikacije metode kojima se umanjuje broj potrebnih točaka integracije s 2^n na $2n+1$ ili $2n$, svaka sa svojim prednostima i nedostacima [8, 9].

4.3 First Order Second Moment (FOSM)

Naziv ove metode proizlazi iz toga što koristi proširenje funkcije Talyorovim redom prvog stupnja za određivanje prvog i drugog momenta funkcije, odnosno očekivanja i varijancije, samo pomoću prvog i drugog momenta slučajnih varijabli. Da bi se odredilo očekivanje i standardna devijacija neke funkcije slučajnih varijabli $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$, trebalo bi poznavati raspodjelu te funkcije. Kako to u praksi često nije

poznato već su poznata samo očekivanja i varijacija slučajnih varijabli x_i , ovom metodom je moguće aproksimirati raspodjelu funkcije y te dobiti tražene vrijednosti za funkciju slučajnih varijabli. Momenti višeg stupnja (trećeg i četvrtog) koji opisuju asimetričnost (eng. *skewness*) i zaobljenost (eng. *kurtosis*) distribucije se zanemaruju. Proširenjem neke funkcije redom prvog stupnja ona se linearizira u odabranoj točki. U ovom slučaju se ta točka odnosi na očekivanje funkcije, a funkcija koja se aproksimira je funkcija graničnog stanja (y). Linearizacija funkcije u točki μ_y može dati velike greške u slučaju izrazito nelinearnih funkcija. Također, metoda u određenim slučajevima daje i različite rezultate za različite formulacije istog problema [5], kako je prikazano u tablici 1. [4]. Da bi se pomoću opisane metode odredila vjerojatnost sloma ili indeks pouzdanosti, potrebno je unaprijed definirati funkciju graničnog stanja koja označava granicu prihvatljivog ponašanja sustava. Indeks pouzdanosti može služiti kao mjera sigurnosti, slično faktoru sigurnosti, pri čemu daje više informacija jer je izravno povezan s vjerojatnošću sloma te raspisivanjem može dati uvid u parametre koji najviše utječu na stabilnost (tablica 1.).

Tablica 1. Koeficijenti pouzdanosti za različite definicije istog slučaja

y	β	
$R - S$	$\frac{F - 1}{\sqrt{F^2 \cdot cov_R^2 + cov_S^2}}$	R – otpornosti S – djelovanja $F = \frac{\mu_R}{\mu_S}$
$\frac{R}{S} - 1$	$\frac{F - 1}{F \sqrt{cov_R^2 + cov_S^2}}$	μ_R – očekivana vrijednost R μ_S – očekivana vrijednost S

4.4 First/Second Order Reliability Metode (FORM, SORM)

Unaprjeđenje FOSM metode napravili su Hasofer i Lind (1974.), u kojemu su predložili invarijantno rješenje za indeks pouzdanosti [4]. U ovom slučaju se funkcija graničnog stanja linearizira u točki najveće vjerojatnosti otkazivanja, umjesto u njenoj očekivanoj vrijednosti. Da bi se ta točka pronašla, potrebno je najprije svaku slučajnu varijablu standardizirati pretvaranjem u jediničnu normalnu slučajnu varijablu kojoj je očekivanje 0, a standardna devijacija i varijacija 1, kako je definirano jednadžbom (6).

$$Z = \frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \quad (6)$$

Formira se nova funkcija graničnog stanja ($g(Z)$) čija je najbliža točka ishodištu, od ishodišta udaljena za vrijednost indeksa pouzdanosti β . Ta se točka često naziva najvjerojatnijom točkom otkazivanja te se proširenje funkcije radi u toj točki [5]. U

slučaju da ploha sloma definirana funkcijom graničnog stanja nije linearna, onda je raznim metodama optimizacije ili iterativnim metodama potrebno naći minimalnu udaljenost plohe od ishodišta. Tada je indeks pouzdanosti funkcija koja ovisi o jediničnim normalnim slučajnim varijablama Z :

$$\beta(Z) = \left(Z^T \cdot Z \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Vjerojatnost otkazivanja se zatim može izračunati prema vezi s indeksom pouzdanosti:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (8)$$

gdje je Φ kumulativna funkcija standardne normalne distribucije.

Slično kao i kod FOSM metode, FORM metoda daje dobre rezultate za približno linearne funkcije u području oko točke najmanje udaljenosti, dok u slučaju izrazito nelinearne plohe graničnog stanja može dati pogrešne rezultate.

SORM metoda razlikuje se od prve utoliko što se funkcija graničnog stanja aproksimira proširenjem drugog reda umjesto prvog, čime se poboljšava aproksimacija funkcije, a definicija same funkcije je ista kao kod FORM. U geotehničkoj praksi se pokazalo da SORM metoda daje vrlo slične rezultate FORM metodi [4].

5 Zaključak

Postoji niz statističkih metoda za primjenu u geotehničkoj praksi, a koje se mogu primijeniti u raznim fazama projektiranja, od samog početka pri planiranju istražnih radova do analiza konačnih rezultata. Metode opisane u ovom radu su neke od najčešće upotrebljivanih. Prilikom provođenja proračuna potrebno je definirati određen broj slučajnih varijabli koje se odnose na bilo koje parametre čiji ishodi ili vrijednosti nisu sa sigurnošću poznate. Njihovom kombinacijom definira se funkcija granične ravnoteže kojom se, bez obzira na korištenu metodu, procjenjuje vjerojatnost pojave nezadovoljavajućih rezultata. U geotehničkoj praksi se još uvijek često izbjegavaju statističke metode, a provode se, iskustveno zadovoljavajuće dobre, determinističke analize. Određene metode mogu poslužiti za jednostavne analize (FOSM, PE, FORM, MCS...), a druge imaju mogućnost primjene i u sofisticiranijim analizama (MCS, SORM...). Kombinacije analitičkih i statističkih metoda mogu se napraviti na više razina - od primjene jednostavnih analitičkih zajedno s jednostavnim statističkim, do primjene kompleksnih analitičkih i statističkih, te bilo kakvih ostalih kombinacija kompleksnosti jednih i drugih analiza [10]. Čak i prilikom upotrebe statističkih metoda u praksi, često se koriste krajnosti gdje se sve usmjeri na

jedan tip analize pa su i rezultati uvjetovani jednim ili drugim tipom. Ujednačeno uključivanje analitičkih i probabilističkih metoda u analizu geotehničkog problema dalo bi optimalne modele u kojima bi se uključivanjem iskustva moglo utjecati na rezultate proračuna, a da se pri tome i dalje obuhvate sve željene nesigurnosti vezane za problem.

Literatura

- [1] Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, (ed. Fenton, G. A.), Lecture notes for the Workshop on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Logan, Utah, 1997.
- [2] European Committee for Standardization: EN 1990:2002+A1:2005, Eurocode - Basis of structural design, 2005.
- [3] Fenton, G. A., Griffiths, D. V.: Review of Probability Theory, Random Variables, and Random Fields (Chapter), Probability Methods in Geotechnical Engineering, (ur. Griffiths, D. V., Fenton, G. A.), Springer Wien New York, Udine, 2007.
- [4] Nadim, F.: Tools and Strategies for Dealing with Uncertainty in Geotechnics (Chapter), Probability Methods in Geotechnical Engineering, (ur. Griffiths, D. V., Fenton, G. A.), Springer Wien New York, Udine, 2007.
- [5] Choi, S.K., Grandhi, R.V., Canfield, R.A.: Reliability-based Structural Design. London: Springer, 2007.
- [6] GEO-SLOPE International, Ltd.: Stability Modeling with GeoStudio, 1200, 700 - 6th Ave SW, Calgary, AB, Canada, 2017.
- [7] Gibson, W.: Probabilistic methods for slope analysis and design, Australian Geomechanics Journal, 46 (2011) 3, pp. 1-10.
- [8] Christian, J.T., Baecher, G.B.: The point estimate method with large number of variables, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 26 (2002) 15, pp. 1515-1529.
- [9] Christian, J.T., Baecher, G.B.: Point-Estimate Method as Numerical Quadrature, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125 (1999) 9, pp. 779-786.
- [10] Kaggwa, W.S., Kuo, Y.L.: Probabilistic techniques in geotechnical modelling - Which one should you use?, Australian Geomechanics Journal, 46 (2011) 3, pp. 21-28.

Kratkoročna optimizacija rada hidroelektrana u nizu

Klaudija Bašić¹, doc.dr.sc. Damir Bekić²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kbasic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, damir.bekic@grad.hr

Sažetak

Hydroenergetski sustavi su višenamjenski objekti čija je osnovna namjena proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora - vode. Osim proizvodnje električne energije, ističe se i zaštita okolnog područja od štetnog djelovanja voda. Optimalan rad hidroelektrana u nizu predstavlja traženje funkcije cilja s obzirom na postavljene kriterije i uz definirana ograničenja koja mogu biti fizikalna i operativna. Dva su glavna kriterija koja se postavljaju pri optimizaciji: kako minimizirati potreban rad te kako maksimizirati korist. Za definiranje optimalnog rada višenamjenskih objekata koriste se različite metode pa je potrebno odabrati prikladnu metodu optimizacije koja odgovara tipu problema. U radu hidroelektrana u nizu poseban izazov predstavlja optimizacija za vrijeme velikih voda. Optimizacija hidroelektrana u nizu uključivat će rezultate hidroloških prognoza.

Ključne riječi: hidroelektrane, optimizacija, obrana od poplava, funkcije cilja, hidrološke prognoze

Short-term optimization of cascade hydropower plant systems

Abstract

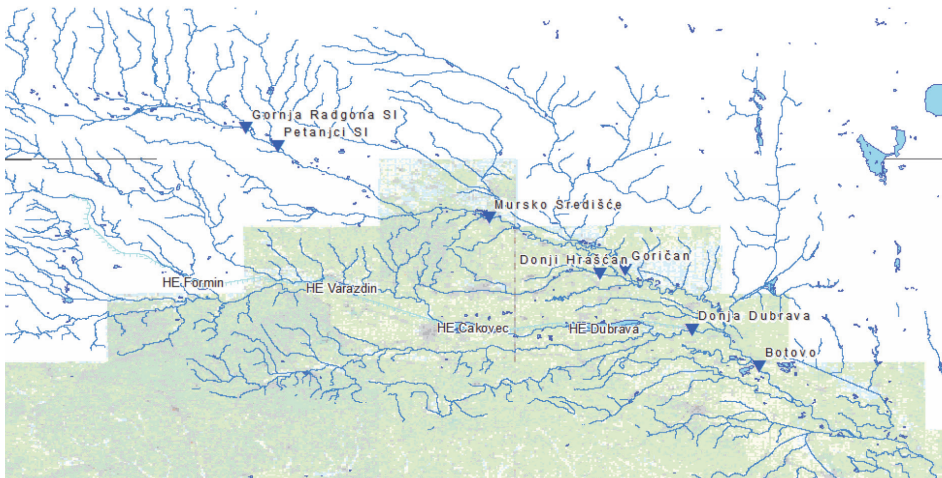
Hydropower plant systems are multifunctional facilities whose primary purpose is to produce electricity from renewable water sources. Besides electrical energy production, a significant objective of these systems is to ensure an appropriate flood control. To define an optimum operation of a hydropower plant, it is necessary to determine an objective function, based on definition of objectives and constraints that can be physical and operational. Two main optimisation criteria involve reducing the effort to minimum, and maximizing the benefit. Various methods are used to define an optimum operation of multifunctional facilities, and an appropriate one must be selected taking into account the type of the problem to be solved. A particular challenge in the use of cascade power plant systems is the optimisation of plant operation in high water conditions. The optimization of cascade hydropower plant systems also involves consultation of hydrological forecast results.

Key words: hydropower plants, optimization, flood control, objective functions, hydrological forecast

1 Uvod

Hydroenergetski sustavi su višenamjenske građevine čija je glavna svrha proizvesti električnu energiju. Zadovoljavanje vršnih potreba za električnom energijom ostvaruje se proizvodnjom električne energije na hidroelektranama iz razloga što su troškovi pogona hidroelektrana znatno manji nego što je to slučaj kod termoelektrana [1-3]. Jedna od važnijih namjena hidroenergetskih sustava je i zaštita okolnog područja od štetnog djelovanja voda. Od ostalih namjena ističu se vodoopskrba, navodnjavanje, plovidba, rekreacija, zaštita od erozije [4]. Optimalno upravljanje hidroelektranom iznimno je zahtjevan zadatak zato što su određene namjene akumulacijskog jezera hidroelektrane oprečne, kao na primjer proizvodnja električne energije i zaštita od štetnog djelovanja voda okolnog područja. Ako se želi optimizirati hidroelektrane u nizu, problem se dodatno komplicira uslijed povećanja broja hidroelektrana. Osim navedenog, slučajna priroda dotoka u akumulacijsko jezero hidroelektrane također otežava rješavanje ovog problema.

Republika Hrvatska jedna je od vodećih država u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora. Više od polovice izvora proizvodnje električne energije, u strukturi elektroenergetskog sustava, čine hidroelektrane. Područje ovog istraživanja su hidroelektrane u nizu na sjeveru Republike Hrvatske (slika 1.), odnosno hidroelektrane HE Varaždin, HE Čakovec i HE Dubrava koje pripadaju proizvodnom području HE Sjever [5].



Slika 1. Pregled predmetnog područja [6]

Osim proizvodnog područja HE Sjever koje se sastoji od tri hidroelektrane, u Hrvatskoj postoje još dva proizvodna područja PP HE Zapad i PP HE Jug. U pogonu se sada nalazi 26 hidroelektrana koje su podijeljene u ta tri proizvodna područja [5].

2 Optimizacija rada višenamjenskih hidroelektrana

2.1 Općenito o optimizaciji višenamjenskih hidroelektrana

Definiranje optimalnog upravljanja višenamjenskim objektima, kao što su akumulacijsko jezero hidroelektrane, svodi se na problem višekriterijske optimizacije. Poteškoće koje se javljaju pri višekriterijskom odlučivanju proizlaze iz činjenice da su namjene takvih objekata u pravilu konfliktne te konačna odluka, odnosno odabir optimalnog načina upravljanja predstavlja kompromis između određenih namjena. Pri donošenju konačne odluke, odnosno u slučaju optimalnog upravljanja hidroelektranama u nizu, mora se voditi računa i o važnostima pojedinih namjena višenamjenskih objekata [7]. Uzmimo za primjer upravljanje radom hidroelektrane tijekom velikovodnog događaja kada su suprotstavljene dvije različite namjene akumulacijskog jezera hidroelektrane, a to su proizvodnja električne energije i zaštita od štetnog djelovanja voda. Sa stajališta proizvodnje električne energije, razina u akumulacijskom jezeru hidroelektrana s dnevnom ili tjednom regulacijom protoka treba se održavati na što većoj razini, odnosno na koti normalnog uspora. Međutim, to se odnosi na periode bez velikovodnih događaja. Tijekom nekog velikovodnog događaja potrebno je održavati razinu vode u akumulacijskom jezeru hidroelektrane što bliže koti minimalnog radnog nivoa za vrijeme tog događaja. Da bi se prihvatio vodni val, potrebno je napraviti i pretpražnjenje akumulacijskog jezera. Predpražnjenje akumulacija za prihvata vodnog vala kod hidroelektrana u nizu potrebno je obavljati od uzvodnih akumulacijskih jezera prema nizvodnima. Međutim, nakon što prođe vodni val potrebno je što prije vratiti razinu u akumulacijskom jezeru na kotu normalnog uspora [8].

2.1 Ograničenja optimizacijskog problema

Kontrolne varijable [9], odnosno varijable koje se mogu mijenjati tijekom optimizacije, mogu biti ograničene i neograničene. Pri upravljanju radom hidroelektrana postoje određena ograničenja, što čini ovaj problem ograničenim [10]. Ograničenja mogu biti fizikalna i operativna [11]. Postavljena ograničenja moraju biti ne-negativna, odnosno moraju biti zadovoljena [12]. Pri upravljanju radom hidroelektrana postoje određena ograničenja. Očuvanje volumena u akumulacijskom jezeru definira se na način da volumen u svakom od akumulacijskih jezera mora biti jednak razlici količine vode koja dotječe u jezero i koja istječe iz jezera preko turbine ili preko preljeva:

$$V_{t+1,i} - V_{t,i} = (Q_{t,i}^F - Q_{t,i}^T - Q_{t,i}^S) \Delta t \quad (1)$$

$V_{t+1,i}$ - volumen u akumulaciji u trenutku t+1

$V_{t,i}$ - volumen u akumulaciji u trenutku t

- $Q_{t,i}^F$ - dotok u akumulacijsko jezero i u trenutku t
 $Q_{t,i}^T$ - protok kroz turbinu akumulacijskog jezera i u trenutku t
 $Q_{t,i}^S$ - protok preko preljeva akumulacijskog jezera i u trenutku t
 Δt - vremenski interval.

Izraz (1) predstavlja izravnu vezu između protoka i volumena u akumulacijskom jezeru. Ako je akumulacijsko jezero prvo u nizu hidroelektrana, tada dotok u jezero predstavlja prirodni protok samog vodotoka. Ako to nije slučaj, kao dotok u akumulacijsko jezero uzima se količina vode koja dolazi iz uzvodnog jezera i količina vode sa sliva promatranog akumulacijskog jezera [11]:

$$Q_{t,i}^F = \sum_{k=1, k \in U}^N (Q_{t,k}^T + Q_{t,k}^S) + Q_{t,k}^I \quad (2)$$

- $Q_{t,i}^F$ - dotok u akumulacijsko jezero i u trenutku t
 $Q_{t,k}^T$ - protok kroz turbinu akumulacijskog jezera k u trenutku t
 $Q_{t,k}^S$ - protok preko preljeva akumulacijskog jezera i u trenutku t
 $Q_{t,k}^I$ - dotok s vlastitog sliva akumulacijskog jezera i u trenutku t .

Fizikalna ograničenja u radu hidroelektrana odnose se na kapacitet akumulacijskog jezera te turbinu, prema [13] su:

- Ograničenje volumena - minimalni i maksimalni dopušteni volumen u akumulaciji

$$V_{i,t}^{min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t}^{max} \quad (3)$$

- $V_{i,t}^{min}$ - minimalno dopušteni volumen u akumulacijskom jezeru i u trenutku t
 $V_{i,t}$ - volumen u akumulacijskom jezeru i u trenutku t
 $V_{i,t}^{max}$ - maksimalno dopušteni volumen u akumulacijskom jezeru i u trenutku t .

- Ograničenje razina u akumulacijskom jezeru - minimalna i maksimalna dopuštena razina u akumulaciji

$$h_{min} \leq h_t \leq h_{max} \quad (4)$$

- h_{min} - minimalno dopuštena razina u akumulacijskom jezeru
 h_t - razina u akumulacijskom jezeru u trenutku t
 h_{max} - maksimalno dopuštena razina u akumulacijskom jezeru

- Ograničenje proizvodnje - maksimalna proizvodnja električne energije hidroelektrane

$$W_{t,i} \leq W_i^{max} \quad (5)$$

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t

W_i^{max} - maksimalno moguća proizvodnja električne energije hidroelektrane i

- Ograničenje ispravnog rada turbina - minimalni protok kroz turbine koji treba osigurati zbog ekoloških, sanitarnih i ekonomskih razloga [11]

$$Q_i^{D,min} \leq Q_{t,i}^T \quad (6)$$

$Q_i^{D,min}$ - minimalno dopušteni protok kroz turbinu akumulacijskog jezera i

$Q_{t,i}^T$ - protok kroz turbinu i u trenutku t .

Operativna ograničenja u radu hidroelektrana odnose se na minimalne zahtjeve vodotoka, prema [13]:

- Ograničenje protoka - minimalni i maksimalni dopušteni izlazni protok iz akumulacijskog jezera preko preljeva i kroz strojarnicu [14]

$$Q_{i,t}^{min} \leq (Q_{i,t} + S_{i,t}) \leq Q_{i,t}^{max} \quad (7)$$

$Q_{i,t}^{min}$ - minimalno dopušteni izlazni protok iz akumulacijskog jezera i u trenutku t

$Q_{i,t}$ - protok kroz turbinu akumulacijskog jezera i u trenutku t

$S_{i,t}$ - protok preko preljeva akumulacijskog jezera i u trenutku t

$Q_{i,t}^{max}$ - maksimalno dopušteni izlazni protok iz akumulacijskog jezera i u trenutku t

2.2 Funkcije cilja

Da bi se definirao optimalan rad hidroelektrana u nizu, potrebno je odrediti funkciju cilja s obzirom na postavljene ciljeve i uz definirana ograničenja [15]. Funkcija cilja može biti postavljena u odnosu na proizvodnju električne energije ili u odnosu na neke druge namjene akumulacijskog jezera hidroelektrane, kao što su vodoopskrba, navodnjavanje, zaštita od štetnog djelovanja voda okolnog područja, plovidbe i drugih. U nastavku će se prikazati funkcije cilja postavljene u odnosu na dvije važne namjene akumulacijskog jezera hidroelektrana, a to su proizvodnja električne energije i zaštita od štetnog djelovanja vode. Važno je odabrati prikladnu funkciju cilja koja će se minimizirati ili maksimizirati. Funkcije cilja sa stajališta proizvodnje električne energije mogu se postaviti na različite načine, odnosno prema različitim kriterijima [10]:

1. Minimiziranje proizvodnje energije iz drugih izvora

Kao drugi izvori za proizvodnju električne energije najčešće se koriste termoelektrane i nuklearne elektrane koje imaju puno veće troškove pogona i održavanja.

$$\min[W_{ce} = \sum_{t=1}^M (D_t - \sum_{i=1}^N W_{t,i})^2] \quad (8)$$

W_{ce} - ukupno proizvedena energija iz drugih izvora

D_t - ukupna potražnja energije u određenom razdoblju

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t .

2. Maksimiziranje proizvodnje električne energije

Postavljanje funkcije cilja na ovaj način ima smisla ako je maksimalna moguća proizvodnja energije uvijek manja od potražnje za električnom energijom. Na taj način se osigurava da će sva proizvedena električna energija biti prodana.

$$\max(W_G = \sum_{t=1}^M \sum_{i=1}^N W_{t,i}) \quad (9)$$

W_G - ukupno proizvedena energija

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t .

3. Maksimiziranje minimalne proizvodnje električne energije

Postavljanje funkcije cilja na ovakav način sa stajališta neovisne tvrtke koja prodaje električnu energiju na tržištu predstavlja maksimiziranje garantirane proizvodnje električne energije bez obzira na moguće okolnosti. Ta proizvedena energija prodaje se po cijeni koja je dogovorena unaprijed dugoročnim ugovorom te u konačnici predstavlja bolju cijenu energije. Sa stajališta cijelog sustava, postavljanje funkcije cilja na ovaj način minimizira potrebu za instalacijom elektrana koje će raditi u periodu kada je raspoloživost hidroenergije mala. Taj cilj je izrazito važan kada postoje velike varijacije u količini oborine, koje bi bez akumulacijskog jezera hidroelektrane, dovele do odgovarajućih varijacija u proizvodnji električne energije.

$$\max \min \sum_{i=1}^N W_{t,i} \quad (10)$$

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t .

4. Maksimiziranje profita od sekundarne energije

Ako se ukupno proizvedena energija u manji za osiguranu energiju koja se definira dugoročnim ugovorom, tada se ta preostala energija prodaje na predviđenom tržištu. Postavljanjem funkcije cilja na ovakav način nastoji se maksimizirati profit od prodaje te energije u trenucima kada se očekuje da je cijena najviša.

$$\max \sum_{t=1}^M p_t \left(\sum_{i=1}^N W_{t,i} - D_c \right) \quad (11)$$

p_t - očekivana cijena električne energije u određenom razdoblju

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t

D_c - osigurana energija.

Za definiranje funkcije cilja sa stajališta zaštite od štetnog djelovanja voda postoje dvije mogućnosti. Jedna od mogućnosti definirana je izrazom (12) da se zanemare sve ostale namjene akumulacijskog jezera hidroelektrane te da se sve podredi zaštiti od štetnog djelovanja voda. Druga mogućnost, izraz (14), odnosi se na to da se uz zaštitu od štetnog djelovanja voda u obzir uzimaju i ostale namjene, odnosno da se osigura određena količina vode u akumulacijskom jezeru hidroelektrane i za vodoopskrbu, navodnjavanje, proizvodnju električne energije i slično [11].

$$\min \sum_{t=1}^M \sum_{i=1}^N (Q_{t,i}^D - Q_i^{fc})^2 \quad (12)$$

$$\min \sum_{t=1}^M \sum_{i=1}^N \max\{Q_{t,i}^D - Q_i^{fc}, 0\} \quad (13)$$

$Q_{t,i}^D$ - ukupni izlazni protok (protok neposredno nizvodno od hidroelektrane i u trenutku t)

Q_i^{fc} - granični protok.

3 Metode optimizacije

Metoda optimizacije ima mnogo te odabir prikladne metode ovisi o problemu optimizacije. Metodama optimizacije nastoji se, uz što kraće vrijeme proračuna i što manje zauzimanje računalne memorije, odrediti optimalno rješenje [16]. U nastavku je dan kratak uvid u determinističke, stohastičke, klasične i napredne metode optimizacije.

3.1 Metode optimizacije prema tipu varijable

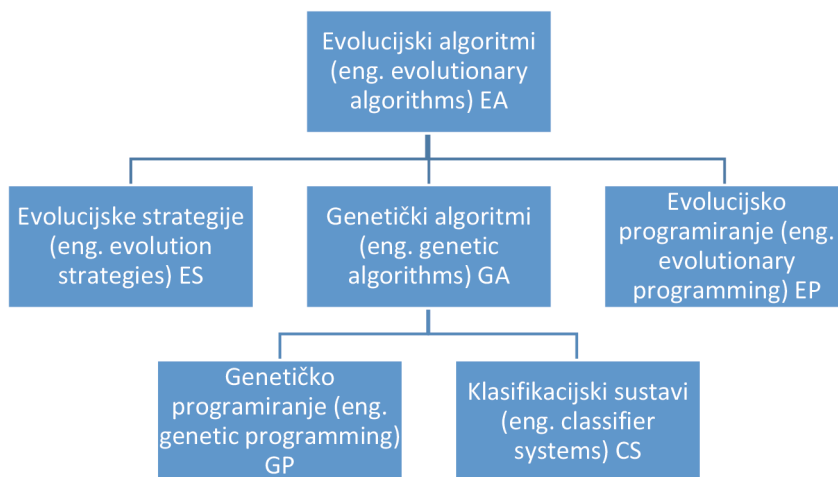
Metode optimizacije prema tipu varijable mogu biti determinističke i stohastičke. Za optimizaciju hidroelektrana u nizu mogu se koristiti i jedne i druge metode. Svaka od njih ima određene prednosti i nedostatke za optimizaciju hidroelektrana u nizu. Stohastička optimizacija ima važnu ulogu u analizi, projektiranju i upravljanju modernim sustavima. Metode stohastičke optimizacije koriste se kod sustava koji su izrazito nelinearni, višedimenzionalni ili na bilo koji drugi način neprimjereni za klasične determinističke metode optimizacije. Stohastički algoritmi za optimizaciju široko su dostupni te imaju široku primjenu na problemima u statistici, znanosti, inženjerstvu i poslovanju [15]. Cilj kod stohastičkih metoda je pronaći pristup koji je primjenjiv za sve ili gotovo sve moguće tipove podataka te optimizira očekivane performanse modela. Prednost u primjeni stohastičkih metoda leži u činjenici da se mogu koristiti u slučajevima kada podaci za određeni problem nisu poznati već se koriste distribucije vjerojatnosti. Stohastička optimizacija uključuje nesigurnosti u model.

Kod determinističkih pristupa pretpostavlja se da su podaci za određeni problem točno poznati, ali u većini praktičnih problema to nije slučaj iz dva razloga. Prvi razlog je uslijed pogreške mjerenja. Drugi i temeljni razlog je da neki podaci predstavljaju podatak odnosno informaciju o budućnosti (npr. prognozirani dotok u akumulacijsko jezero hidroelektrane, cijena za buduće razdoblje) te se taj podatak ne može sa sigurnošću točno znati [10]. Stohastički pristupi su fleksibilniji i učinkovitiji od determinističkih pristupa, ali vjerojatnost dobivenog rješenja nije zajamčena [18].

3.2 Metode optimizacije prema pristupu

Za definiranje optimalnog upravljanja višenamjenskim hidroelektranama koriste se različite metode. Metode optimizacije prema pristupu dijele se na klasične i na napredne metode optimizacije. Odabir prikladne metode optimizacije ovisi o tipu problema optimizacije. Klasične metode optimizacije koriste se kod jednodimenzionalnih i višedimenzionalnih problema optimizacije.

Od klasičnih metoda najčešće se koriste direktne metode kao što su metoda zlatnog reza te metoda kvadratne interpolacije, gradijentne metode, metode linearnog programiranja te metode unutarnje točke. S obzirom na to da su problemi u praksi dosta složeni i nelinearni te su ciljevi višestruko suprotstavljeni, klasične metode nisu učinkovite u rješavanju ovih problema. Tada se primjenjuju metode kao što su metoda simuliranog kaljenja ili evolucijski algoritmi [19].



Slika 2. Podjela evolucijskih algoritama [20]

Evolucijski algoritmi (slika 2.) su skup modernih stohastičkih metoda koje se uspješno koriste u rješavanju vrlo složenih problema. Valja naglasiti da je metoda i raznih varijacija mnogo. Kao važnije ističu se dvije grupe evolucijskih algoritama, a to su genetičko programiranje i klasifikacijski sustavi [21].

4 Utjecaj hidroloških prognoza na optimalno upravljanje hidroelektranama u nizu

Hidrološke prognoze izravno utječu na nepouzdanosti i pogreške pri proizvodnji električne energije te predstavljaju rizik pri provedbi plana proizvodnje električne energije. Ako se za definiranje plana proizvodnje električne energije koriste prognozirani dotoci, a ne izmjerene vrijednosti, tada na primjenu definiranog plana proizvodnje električne energije može utjecati nepouzdanost i nepreciznost hidroloških prognoza dotoka u akumulacijsko jezero hidroelektrane. Iz tog razloga, izvorni plan upravljanja radom hidroelektrana neće biti proveden kako je planirano, već će se trebati prilagođavati i prepravljati tijekom vremena. Ovakav način rada može znatno utjecati na sigurnost samih hidroelektrana. Stoga prilikom izrade plana proizvodnje električne energije treba obratiti posebnu pozornost na nepouzdanost hidroloških prognoza [22].

Pri određivanju optimalnog upravljanja radom hidroelektrana u nizu, razmatra se u ovom radu utjecaj determinističkih i probabilističkih hidroloških prognoza. Deterministička i stohastička optimizacija hidroelektrana u nizu za vrijeme velikih voda proizvodit će se u kombinaciji s rezultatima determinističkih i probabilističkih hidroloških

prognoza. Odredit će se koja od ovih kombinacija pruža značajnu zaštitu od štetnog djelovanja voda nizvodnog područja hidroelektrana u nizu a da pritom ne utječe na proizvodnju električne energije ili kojom kombinacijom možemo ostvariti željenu razinu zaštite od poplava uz povećanje proizvodnje električne energije [3].

5 Zaključak

Uslijed klimatskih promjena dolazi do složenih vremenskih i prostornih promjena vodnih resursa što može dovesti do promjene uvjeta vezanih za rad višenamjenskih građevina kao što su hidroelektrane. Određivanje optimalnog rada hidroelektrana u nizu zahtjevno je s obzirom na veliki broj ulaznih varijabli, nelinearnosti dinamike sustava, slučajne prirode dolaznih protoka te ostalih nesigurnosti sustava [23]. Za rješavanje ovog problema postoji mnogo razvijenih metoda, pa treba odabrati one koje će ispravno riješiti optimizaciju rada hidroelektrana u nizu. Navedeni problem je višekriterijski, s ograničenjima i nelinearan. U radu su dane smjernice za istraživanje unapređenja planiranja rada hidroelektrana u nizu za vrijeme velikih voda uz prethodno definirane kriterije i funkcije cilja. Očekuje se da će rezultati budućih istraživanja pokazati kako je na temelju hidroloških prognoza moguće kratkoročno optimizirati rad hidroelektrana u nizu i povećati njihovu razinu sigurnosti za vrijeme velikih voda. Osim toga, očekuje se da će uključivanje višekriterijskog odlučivanja u planiranju rada rezultirati efikasnijim i ekonomičnijim radom višenamjenskih hidroelektrana.

Literatura

- [1] Heydari, M., Othman, F., Taghieh, M.: Optimization of multiple and multipurpose reservoir system operations by using matrix structure (Case study: Karun and Dez Reservoir Dams), PLoS ONE 11 (2016), pp. 1-16.
- [2] Sharma, R. N. et al.: Decision support system for operation, scheduling and optimization of hydro power plant in Jammu and Kashmir region, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43 (2015), pp. 1099-1113.
- [3] Fan, F. M. et al.: Performance of Deterministic and Probabilistic Hydrological Forecasts for the Short-Term Optimization of a Tropical Hydropower Reservoir, Water Resources Management, 30 (2016), pp. 3609-3625.
- [4] Multipurpose Use of Hydropower Reservoirs, https://energypedia.info/wiki/Multipurpose_Use_of_Hydropower_Reservoirs
- [5] HEP proizvodnja, <http://proizvodnja.hep.hr/proizvodnja/osnovni/hidroelektrane/default.aspx>
- [6] Copernicus - Europe's eyes on Earth, <https://land.copernicus.eu/pan-european>

- [7] Vlah, S.: Modeli višekriterijskog odlučivanja i heuristike za njihovo rješavanje., Magistarski rad, 2008.
- [8] Xie, W. et al.: Short-term power generation scheduling rules for cascade hydropower stations based on hybrid algorithm, *Water Science and Engineering*, 5 (2012), pp. 46-58.
- [9] PMF - Optimizacija, https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/PREDAVANJE5.pdf
- [10] Neos Guide, <https://neos-guide.org/optimization-tree>
- [11] Scola, L.A., Takahashi, R.H.C., Cerqueira, S.A.A.G.: Multipurpose Water Reservoir Management: An Evolutionary Multiobjective Optimization Approach, *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-14, 2014.
- [12] Zamarin, A., Jelovica, J., Hadjina, M.: Optimizacija strukture s više funkcija cilja - Pregled postojećih metoda genetskog algoritma, *Engineering Review* 29 (2009), pp. 87-100.
- [13] Madani, K., Lund, J.R.: Modeling California's high-elevation hydropower systems in energy units, *Water Resources Research*, 45 (2009), pp. 1-12.
- [14] Lu, P. et al.: Short-term hydro generation scheduling of Xiluodu and Xiangjiaba cascade hydropower stations using improved binary-real coded bee colony optimization algorithm, *Energy Conversion and Management*, pp. 19-31, 2015.
- [15] Labadie, J.W.: Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130 (2004), pp. 93-111.
- [16] Rothlauf, F.: Optimization Methods (Chapter), *Design of Modern Heuristics*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 45-102, 2011.
- [17] Spall, J.C.: Stochastic Optimization (Chapter), *Handbook of Computational Statistics*, (ur. Gentle, J., Härdle, W., Mori, Y.), Springer Heidelberg, Dordrecht, London and New York, pp. 170-194, 2004.
- [18] Lin, M.H., Tsai, J.F., Yu, C.S.: A Review of Deterministic Optimization Methods in Engineering and Management, *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-15, 2012.
- [19] Shodhganga - a reservoir of Indian theses, http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/11449/9/09_chapter%204.pdf
- [20] Grundler, D.: Evolucijski algoritmi (I) - Pobude i načela, *Automatika*, 42 (2001), pp. 13-22.
- [21] Introduction on Evolutionary Algorithms, <http://neo.lcc.uma.es/opticomm/introea.html>
- [22] Wang, L. et al.: Study on optimization of the short-term operation of cascade hydropower stations by considering output error, *Journal of Hydrology*, 549 (2017), pp. 326-339.
- [23] Gjengedal, T.: Optimization in Short-Term Operation of Hydro Power Systems, *Engineering Review*, 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Tenerife, pp. 290-300, 2006.

Pročišćavanje otpadnih voda internih i individualnih sustava odvodnje elektrokemijskim procesima

Hana Posavčić¹, doc.dr.sc. Ivan Halkijević²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, hposavcic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, halkijevic@grad.hr

Sažetak

Elektrokoagulacija i elektrokemijski napredni oksidacijski procesi dokazano učinkovito uklanjaju različite vrste onečišćenja. Međutim, većina dosadašnjih ispitivanja provedena je na uređajima malih kapaciteta, a nedostaju i ispitivanja kombinacije oba procesa. Istovremeno, interni sustavi odvodnje imaju niz nedostataka te zahtijevaju alternativno rješenje. Stoga bi buduća istraživanja trebala biti usmjerena na razvoj novih tržišno kompetitivnih elektrokemijskih naprednih oksidacijskih tehnologija pročišćavanja.

Ključne riječi: elektrokoagulacija, napredni oksidacijski procesi, interni sustavi odvodnje, pilot uređaj, elektrokemija

Wastewater treatment of internal and individual drainage systems by electrochemical processes

Abstract

The electrocoagulation and electrochemical advanced oxidation processes have been proven to effectively remove various types of contamination. However, most previous research has been conducted on small-scale units, while testing involving the combination of the two processes is still quite insufficient. At the same time, internal wastewater drainage systems exhibit a number of deficiencies and require an alternative solution. Therefore, future research should be focused on the development of new commercially competitive electrochemical advanced oxidation technologies.

Key words: electrocoagulation, advanced oxidation processes, internal drainage systems, pilot device, electrochemistry

1 Uvod

Nemar i nepotrebni gubici u vodoopskrbnom sustavu, štetne tvari iz industrije i poljoprivrede te nepročišćene otpadne vode iz kućanstva ugrožavaju izvorišta vode gradova i naselja. Ove štetne tvari ulaze u ciklus kruženja vode te tako nepovratno narušavaju ravnotežu ekosustava. Ispuštanje otpadnih voda u prijamnike (vodna tijela) bez prethodnog pročišćavanja ugrožava prije svega zdravlje i život čovjeka, ali i opstanak mnogih biljnih i životinjskih vrsta. Pročišćavanje otpadnih voda obavlja se primjenom fizikalnih, bioloških, kemijskih i fizikalno-kemijskih postupaka, i to do granice kada koncentracija pojedinih onečišćenja postaje neopasna za život i zdravlje ljudi te ne uzrokuje nepoželjne promjene u okolišu [1, 2]. Međutim, potreba za ekološki i ekonomski prihvatljivijim te učinkovitijim procesima pročišćavanja dovela je do razvoja tehnološki naprednijih procesa kao što su elektrokemijske i napredne oksidacijske tehnologije. Visoka učinkovitost, niski operativni troškovi i mogućnost uklanjanja različitih vrsta onečišćenja samo su neke od prednosti tih tehnologija zbog čega se primjenjuju u svim fazama pročišćavanja, od predtretmana otpadnih voda do završnih obrada mulja [3].

U Hrvatskoj danas više od 40 % ukupnog stanovništva živi u naseljima manjim od 2000 stanovnika gdje je odvodnja otpadnih voda riješena internim sustavima [4]. U većini slučajeva takve sustave zbog tehničkih i/ili ekonomskih razloga nije opravdano spojiti na sustave javne odvodnje te se kao alternativa standardnim metodama pročišćavanja otpadnih voda, nameću upravo elektrokemijski i napredni oksidacijski procesi (NOP). Stoga ciljevi budućih istraživanja vezani uz pročišćavanje otpadnih voda internih sustava odvodnje, ali i manjih naselja, otoka i dislociranih objekata trebaju biti usmjereni upravo na razvoj ovakvih tehnologija.

2 Općenito o elektrokemijskim procesima

2.1 Elektrokemijski napredni oksidacijski procesi

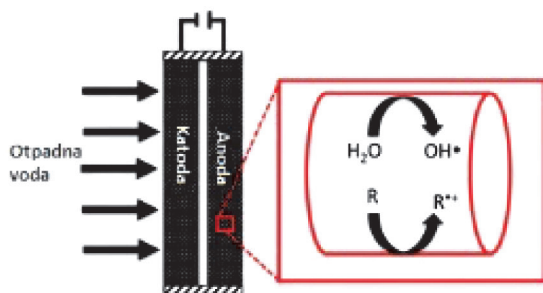
Napredni oksidacijski procesi (NOP) koriste slobodne radikale za razgradnju postojećih organskih i neorganskih onečišćivača [5]. Slobodni radikali su atomi ili molekule koji su sposobni samostalno postojati te posjeduju jedan ili više nesparenih (slobodnih) elektrona, a neki od njih su superoksidni radikali ($O_2^{\cdot-}$), hidroperoksilni radikali (HO_2^{\cdot}), hidroksilni radikali ($\cdot OH$) i alkoksilni radikali (RO^{\cdot}). Smatra se da hidroksilni radikali imaju ključnu ulogu u pročišćavanju otpadnih voda NOP-ima [6].

Elektrokemijski napredni oksidacijski procesi (ENOP) su vrsta NOP-a koji se temelje na elektrokemijskim tehnologijama. Glavni ENOP-i uključuju anodnu oksidaciju, gdje se na anodi generiraju heterogeni hidroksilni radikali, kao i elektro-Fenton, fotoelektro-Fenton i sonoelektrokemiju, kada se u otopini proizvode homogeni

hidroksilni radikali. Također, za proizvodnju heterogenih i homogenih hidroksilnih radikala moguće je kombinirati ove procese [7]. Hidroksilni radikali nastaju oksidacijom vode na površini anode (jednadžba 1, slika 1.) [8]:



Pokazalo se da direktne reakcije prijenosa elektrona predstavljaju dodatni mehanizmi za oksidaciju spojeva, pri čemu se elektron prenosi direktno od onečišćivala (R) do anode (jednadžba 2, slika 1.) [8]:



Slika 1. Elektrokemijski napredni oksidacijski proces [8]

Kako bi se ubrzala proizvodnja radikala i spriječilo otpuštanje kisika, elektrode su najčešće napravljene od platine, ugljika ili grafitu, iridijevog dioksida, rutenijevog dioksida, kositrovog dioksida, dijamanta obogaćenog borom, olovo (IV) oksida, titanovog dioksida i dr. Među njima, dijamant obogaćen borom se pokazao kao najučinkovitiji materijal [7].

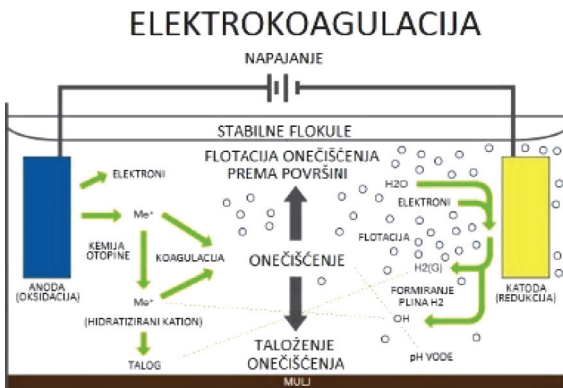
Neke od prednosti ENOP-a su: energetska učinkovitost, automatizacija procesa, potrebna je jednostavna oprema, sigurnost zbog upravljanja u blagim klimatskim uvjetima (sobna temperatura i tlak), primjenjivi su za različite vrste onečišćenja te su zbog izostanka dodavanja kemikalija ekološki prihvatljiviji od drugih NOP-a. Međutim, velika potrošnja električne energije, niska provodljivost većine otpadnih voda i kratkotrajnost materijala elektroda neki su od nedostataka ove metode [5, 7]. Učinkovitost i raznolikost ENOP-a dokazane su njihovim korištenjem za uklanjanje različitih vrsta onečišćenja iz sintetičkih otopina koje sadrže fenole, boje, pesticide i lijekove, ali i iz stvarnih industrijskih otpadnih voda. Unatoč velikom broju publikacija na ovu temu i dobrim rezultatima dobivenim laboratorijskim ispitivanjima, nedostaje praktične primjene uklanjanja organskog onečišćenja. No, intenzivna istraživanja poboljšala su elektrokatalitičku aktivnost i stabilnost materijala elektroda te optimizirala geometriju reaktora što je dovelo do razvoja prvih pilot uređaja, pa čak i komercijaliziranih uređaja za dezinfekciju i pročišćavanje voda onečišćenih organskim spojevima [7].

2.1 Proces elektrokoagulacije

Pojam elektrokoagulacija (EK) se pojavio davne 1889. godine u opisu londonskog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, gdje se elektrokemijski tretman koristio pri miješanju kućanske otpadne vode i morske vode. Prva primjena aluminijskih i željeznih elektroda dogodila se 1909. u SAD-u kada je patentirana elektroliza za pročišćavanje otpadnih voda [9]. Sličan proces se koristio 1956. u Velikoj Britaniji gdje su se željezne elektrode koristile za tretman onečišćenih rijeka [9].

U ranijim istraživanjima, EK se koristila za uklanjanje suspendiranih tvari, teških metala, proizvoda obrade nafte, boja, fluora i otpadnih voda iz sustava javne odvodnje. U zadnja dva desetljeća primjena EK se proširila na različite vrste otpadnih voda koje sadrže metale, hranu, ulje, tekstilne boje, arsen i sl. [9].

Proces EK (slika 2.) podrazumijeva stvaranje koagulanata upotrebom električnog polja i žrtvujućih elektroda radi izdvajanja, agregiranja i taloženja onečišćenja iz otpadne vode te uključuje tri faze: elektrolitsku oksidaciju žrtvujućih elektroda, formiranje koagulanata u otopini i adsorpciju otopljenih čestica na koagulate te njihovo uklanjanje sedimentacijom ili flotacijom [10, 11].



Slika 2. Proces elektrokoagulacije [12]

Elektrode su najčešće napravljene od željeza (Fe) ili aluminija (Al). Prema jednadžbama (3) i (4), željezni i aluminijski kationi otapaju se s anoda [13]:



dok se na katodi otpušta vodik, izraz (5):



U otopini, pozitivno nabijeni ioni se privlače s negativno nabijenim hidroksidima te proizvode ionske hidrokside koji se snažno privlače sa disperziranim česticama te uzrokuju koagulaciju [13].

Prema Mollah i sur. [14], prednosti EK procesa su: izostanak dodavanja kemikalija, dobivena voda je čista, bez boje i mirisa, generira se manja količina mulja u usporedbi sa sličnim tehnologijama, formirane flokule su veće, stabilnije, otporne na kiseline i sadrže manje vode nego one dobivene kemijskom koagulacijom zbog čega ih je lakše ukloniti, a oprema je jednostavna te ju je lako održavati. Međutim, elektrode treba redovito održavati i mijenjati, potrebna je visoka provodljivost otopine, može doći do formiranja nepropusnog inhibirajućeg filma (sloja) na katodi što može dovesti do smanjenja učinkovitosti postupka te su mogući visoki troškovi električne energije [9, 14].

3 Smjernice za daljnja istraživanja

Razvoj komunalne infrastrukture u Hrvatskoj u velikoj mjeri zaostaje za razvijenim zemljama zapadne i srednje Europe, kao i za ostalim razvijenim zemljama svijeta. U Hrvatskoj danas više od 1.5 milijuna stanovnika, tj. oko 40 % od ukupnog stanovništva, živi u naseljima manjim od 2000 stanovnika, što čini ukupno 469 evidentiranih aglomeracija koje nisu obuhvaćene programom osnovnih mjera kontrole onečišćenja iz točkastih izvora onečišćenja (izgradnja uređaja za pročišćavanje za aglomeracije veće od 2000 ES) [15]. U tim je naseljima odvodnja otpadnih voda riješena individualnim/internim sustavima te je očito da, nakon završetka provedbe osnovnih mjera kontrole kakvoće vodnih tijela, kod znatnog broja naselja neće biti postignuto najmanje dobro stanje voda [4].

Individualni i interni sustavi odvodnje otpadnih voda čine skup građevina koje nisu dio sustava javne odvodnje otpadnih voda, a kojim se prikupljaju, transportiraju i na odgovarajući način pročišćavaju sanitarne i biorazgradive tehnološke otpadne vode prije ispuštanja u prijamnik (kopnene i priobalne vode) ili sustav javne odvodnje. Kod ovakvih sustava ujedno ne postoji fizička mogućnost spajanja na sustave javne odvodnje zbog dislociranog smještaja (ruralna naselja, manja naselja na otocima, autokampovi, individualni objekti parkova prirode i nacionalnih parkova i sl.) ili ih zbog tehničkih i/ili ekonomskih razloga nije opravdano spojiti (NN 3/11) [16].

Odgovarajući načini pročišćavanja ovakvih sustava propisani su Odlukom o odvodnji otpadnih voda koju donose jedinice lokalne samouprave. Pri tome se kao odgovarajući način (stupanj) pročišćavanja propisuje taloženje u sabirnim i septičkim jamama, ili se zahtijeva da po ispuštanju u prijamnik ili sustav javne odvodnje, koncentracije onečišćujućih tvari ne prekoračuju dopuštene granične vrijednosti propisane Pravilnikom o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN 80/13, 43/14, 27/15 i 3/16) [17].

U odnosu na brojne nedostatke sabirnih i septičkih jama, kao što su neugodan miris, problem stabilnosti u područjima s visokim razinama podzemne vode, potreba praćenja razine punjenja spremnika, itd. [18-20], pred svjetsku istraživačku zajednicu postavljen je velik izazov vezan za razvoj novih ekonomski prihvatljivih tehnologija, visoke učinkovitosti pročišćavanja uz mogućnost ponovnog korištenja pročišćene vode, jednostavnog pogona i održavanja, energetske neovisnijih, smanjene emisije CO₂ uz generiranje manjih količina otpada kao nusproizvoda u postupku pročišćavanja te pozitivnih povratnih reakcija od strane krajnjih korisnika.

Prema novijim istraživanjima, metode EK i NOP-a pokazuju se kao izrazito učinkovite metode u uklanjanju različitih otpadnih tvari u procesima kondicioniranja pitkih voda i pročišćavanja različitih vrsta otpadnih voda [14, 21-23]. Obje metode se u pročišćavanju sanitarnih otpadnih voda intenzivnije istražuju posljednjih 30-ak godina, pri čemu nedostaju terenska istraživanja na pilot uređajima i studije slučaja s optimizacijom procesa, kao i povećanje stupnja dezinfekcije u odnosu na specifičan sastav otpadnih voda. Većina dosadašnjih ispitivanja primjene EK i NOP provedena je u laboratorijskim uvjetima na vrlo malim uređajima (reaktorima) kapaciteta do 5 litara, pri čemu procesni parametri i dobiveni rezultati (učinkovitost pročišćavanja i pokazatelji operativnih troškova), uslijed različitih metodoloških pristupa laboratorijskog modeliranja samog postupka (različite postavke i veličine reaktora u kombinaciji s pojedinim sintetiziranim onečišćenjima), nisu direktno primjenjivi u realnim uvjetima, tj. u uvjetima pročišćavanja većih količina otpadnih voda različitog sastava [21, 23-25]. Veliki nedostatak postojećih istraživanja EK i ENOP tehnologije vezan je uz izostanak ispitivanja kombinacija oba procesa te primjenu šaržnih reaktora, čija je primjena manjkava u uvjetima većeg dotoka sanitarnih otpadnih voda [26, 27].

U skladu s navedenim, cilj je budućih istraživanja razviti novu tržišno kompetitivnu elektrokemijsku naprednu oksidaciju tehnologiju pročišćavanja sanitarnih otpadnih voda, koja se temelji na kombinaciji EK i ENOP-a. U tom smislu planira se nadogradnja postojećeg pilot EK uređaja koji se nalazi u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (slika 3.).



Slika 3. Pilot EK uređaj instaliran u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu

Novi, nadograđeni, uređaj uključivat će komponente ENOP-a i dodatne komponente koje će omogućiti energetski autonoman rad (solarni paneli i vjetrogeneratori). Tako nadograđeni uređaj prikladan je za individualna kućanstva, a uz mogućnost modularne izvedbe i za manja naselja veličine do 2000 ekvivalent stanovnika (ES). Visoka učinkovitost takvog uređaja omogućila bi ponovno korištenje pročišćene vode, npr. kao tehnološke (ispiranje zahoda, zalijevanje zelenih površina, navodnjavanje u slučaju kada postoji manjak raspoloživih količina pitke vode (npr. priobalje i otoci u ljetnim mjesecima) i dr. Za razliku od konvencionalnih metoda, za smještaj ovakvog uređaja potreban je znatno manji prostor, a djelomično ili potpuno autonomno pročišćavanje otpadnih voda omogućava smještaj uređaja na lokacijama gdje ne postoji priključak na električnu infrastrukturu. Nadalje, ponovnim korištenjem pročišćene vode moguće je već na razini jednog kućanstva ostvariti značajno smanjenje potrošnje pitke vode (osobito u ljetnim mjesecima, kada mnoga područja oskudijevaju vodom), a time i ekonomske uštede. U budućnosti, uređaj se može koristiti kao završni stupanj pročišćavanja otpadnih voda na postojećim uređajima s konvencionalnim tehnologijama i za obradu mulja s ciljem dobivanja mulja manjih količina i povoljnijih karakteristika.

4 Zaključak

S obzirom na niz prednosti, ENOP i proces EK koriste se za uklanjanje različitih vrsta onečišćenja, kao što su suspendirane tvari, metali i ulja. Međutim, većina dosadašnjih ispitivanja provedena je u laboratorijskim uvjetima na vrlo malim uređajima zbog čega dobiveni rezultati nisu primjenjivi u stvarnim uvjetima, odnosno u uvjetima pročišćavanja većih količina otpadnih voda. Stoga je potrebno provesti veći broj ispitivanja na pilot-uređajima sa stvarnim karakteristikama otpadnih voda. Također, veliki nedostatak dosadašnjih ispitivanja EK i ENOP tehnologije vezan je uz izostanak ispitivanja kombinacija obaju procesa. U budućim istraživanjima planira se nadogradnja postojećeg pilot EK uređaja jednim od ENOP-a i ispitivanje učinkovitosti pročišćavanja komunalnih otpadnih voda s ciljem utvrđivanja procesnih parametara i operativnih troškova u realnim uvjetima dotoka i sastava otpadnih voda. Između ostalog, takav uređaj bi se mogao koristiti kao alternativa internim i individualnim sustavima odvodnje koji zahtijevaju učinkovitije pročišćavanje otpadnih voda. Očekuje se da će rezultati budućih istraživanja rezultirati tehnologijom pročišćavanja koja će se, osim pročišćavanja internih i individualnih sustava odvodnje, moći koristiti i za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda otoka i manjih naselja koji nisu sastavni dijelovi identificiranih aglomeracija za odvodnju otpadnih voda u Republici Hrvatskoj. Također, taj će se uređaj moći koristiti i za pročišćavanje otpadnih voda dislociranih objekata kod kojih veći zahvati na izgradnji sustava odvodnje nisu ekološki prihvatljivi, primjerice kao što su planinarski domovi, pojedinačni objekti u nacionalnim parkovima i parkovima prirode i sl. Osim toga, očekuje se da će visoka učinkovitost uklanjanja onečišćenja omogućiti ponovnu upotrebu pročišćenih otpadnih voda, a karakteristike dobivenog mulja omogućiti rješenje problema njegovog trajnog odlaganja.

Literatura

- [1] Zelena energija, Biološko pročišćavanje otpadnih voda, <http://www.zelenaenergija.org/clanak/biolosko-prociscavanje-otpadnih-voda/410>
- [2] Tušar, B.: Pročišćavanje otpadnih voda, Zagreb, Hrvatska: Kigen d.o.o, 2009.
- [3] Feng, Y., Yang, L., Liu, J., Logan B.E.: Electrochemical technologies for wastewater treatment and resource reclamation, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 2 (2016), pp. 800-831.
- [4] Strategija upravljanja vodama, Zagreb, Hrvatska: Hrvatske vode, 2009.
- [5] Fang, C., Megharaj, M., Naidu, R.: Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOP) to degrade per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs), *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 20 (2017) 2, <https://doi.org/10.1515/jaots-2017-0014>

- [6] Wang, J.L., Xu, L.J.: Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42 (2012), pp. 251-325.
- [7] Sires, I., Brillas, E., Oturan, M.A., Rodrigo, M.A., Panizza, M.: Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow, *Environ Sci Pollut Res*, 21 (2014), pp. 8336-8367.
- [8] Chaplin, B.P.: Critical review of electrochemical advanced oxidation processes for water treatment applications, *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 16 (2014), pp. 1182-1203.
- [9] Kabdaşlı, I., Arslan-Alaton, I., Ölmez-Hancı, T., Tünay, O.: Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review, *Environmental Technology Reviews*, 1 (2012), pp. 2-45.
- [10] Gardić, V.: Primena elektrohemijskih metoda za pročišćavanje otpadnih voda. Deo I – elektrodepozicija i elektrokoagulacija, *Zaštita materijala*, 48 (2007), pp. 49-58.
- [11] Ozyonar, F.: Treatment of Train Industry Oily Wastewater by Electrocoagulation with Hybrid Electrode Pairs and Different Electrode Connection Modes, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 11 (2016), pp. 1456-1471.
- [12] Electrocoagulation Technology, <https://www.crs-reprocessing.com/en/crs-solutions/electrocoagulation/>
- [13] Naje, A.S., Abbas, S.A.: Electrocoagulation Technology in Wastewater Treatment: A review of Methods and Applications, *Civil and Environmental Research*, 3 (2013), pp. 29-42.
- [14] Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke, D.L.: Electrocoagulation (EC) – science and applications, *Journal of Hazardous Materials*, B84 (2001), pp. 29-41.
- [15] Plan upravljanja vodnim područjima 2016. – 2021., Zagreb, Hrvatska: Hrvatske vode, 2016.
- [16] Pravilnik o tehničkim zahtjevima za građevine odvodnje otpadnih voda, kao i rokovima obvezne kontrole ispravnosti građevina odvodnje I pročišćavanja otpadnih voda, Zagreb, Hrvatska, Narodne novine (NN 3/11) 2011.
- [17] Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, Zagreb, Hrvatska, Narodne novine (NN 3/16) 2016.
- [18] Advantages and Disadvantages of Septic Tanks, <http://marketingvisible.com>
- [19] Advantages and Disadvantages of Septic Tanks, <http://civildelights.blogspot.com>
- [20] Pawlita-Posmyk, M., Wzorek, M.: Domestic sewage treatment plant or ecological septic tank, *Technical Transactions*, 5 (2017), pp. 195-203

- [21] Sahu, O., Mazumdar, B., Chaudhari, P.K.: Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review, *Environ Sci Pollut Res*, 21 (2014), pp. 2397-2413
- [22] Moussa, D.T., El-Naas, M.H., Nasser, M., Al-Marri, M.J.: A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges, *Journal of Environmental Management*, 186 (2017), pp. 24-41
- [23] Moreira, F.C., Boaventura, R.A.R., Brillas, E., Vilar, V.J.P.: Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters, *Applied Catalysis B: Environmental*, 202 (2017), pp. 217-261
- [24] Butler, E., Hung, Y.-T., Yeh, R.-L., Suleiman Al Ahmad, M.: Electrocoagulation in Wastewater Treatment, *Water*, 3 (2011), pp. 495-525.
- [25] Kuokkanen, V., Lassi, U.: Recent Applications of Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater – A Review, *Green and Sustainable Chemistry*, 3 (2013), pp. 89-121.
- [26] Aziz, A.R.A., Asaithambi, P., Daud, W.M.A.B.W.: Combination of electrocoagulation with advanced oxidation processes for the treatment of distillery industrial effluent, *Process Safety and Environmental Protection*, 99 (2016), pp. 227-235.
- [27] Garcia-Segura, S., Eiband, M.M.S.G., de Melo, J.V., Martinez-Huitle, C.A.: Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801 (2017), pp. 267-299.

Vrednovanje održivosti mostova kao dijela prometne infrastrukture

Ivana Milić¹, doc.dr.sc. Jelena Bleiziffer²

¹ Zagreb, ivana.milic211@gmail.com

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, jbleiziffer@grad.hr

Sažetak

Suočavanje s promjenama na globalnoj razini potreba za izgradnjom naprednih, ekonomski opravdanih, ekološki pogodnih i održivih konstrukcija jest nužnost. Mostovi imaju veliko značenje u prometnoj infrastrukturnoj mreži i snažno utječu na društvo, te su direktno i/ili indirektno povezani sa nizom gospodarskih djelatnosti. Prepoznavanje takve interakcije i njena ispravna valorizacija predstavlja značajan iskorak prema održivom projektiranju. U radu su opisani različiti pristupi održivog projektiranja infrastrukturnih projekata i postupak njihova vrednovanja kao podloga za daljnja istraživanja.

Ključne riječi: prometna infrastruktura, mostovi, održivost, održivo projektiranje, održivi mostovi

Evaluation of sustainability of bridges as a part of transport infrastructure

Abstract

In the light of changes on the global level, the need has arisen to create more advanced, economically justified, environmentally friendly, and sustainable structures. Bridges have a great significance in transport infrastructure: they exert a strong influence on the society, and are directly and/or indirectly linked with a wide range of economic activities. Recognizing that interaction, and its proper assessment, constitute a significant step towards sustainable design. Various approaches to sustainable design of infrastructure projects, and the procedure for their assessment as the basis for further research, are described in the paper.

Key words: transport infrastructure, bridges, sustainability, sustainable design, sustainable bridges

1 Uvod

Početak koncepta održivog razvoja možemo pronaći na Svjetskoj konferenciji o zaštiti čovjekova okoliša (United Nations Conference on the Human Environment) [1] koja je održana u Stockholmu u lipnju 1972. godine. Nastavlja se Komisijom Ujedinjenih naroda za okoliš i razvoj (World Commission on Environment and Development) [2] koja je 1987. godine donijela izvješće "Naša zajednička budućnost" (Our Common Future) iz kojeg je proizašla najkorištenija definicija održivog razvoja prema Brundtlandu, a glasi da je održivi razvoj: "Razvoj koji zadovoljava potrebe današnjice bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija u zadovoljavanju njihovih potreba." Nadalje su bitne konferencija Ujedinjenih naroda o okolišu i razvitku (United Nations Conference on Environment and Development – UNCED) [3] u Rio de Janeiru, Brazil 1992., gdje je usvojena Agenda 21 te Milenijska deklaracija [4], koju je UN donio u rujnu 2000. godine usvojivši 8 ključnih razvojnih ciljeva za novi milenij i aktivnosti nužne za njihovo uspješno realiziranje do 2015. godine. Prema [5], održivi razvoj potom dobiva veliku političku podršku na Svjetskom sastanku na vrhu o održivom razvitku (World Summit on Sustainable Development – WSSD) [6], poznatom kao i "Rio+10" održanom 2002. godine u Johannesburgu. Prema [7], na konferenciji Ujedinjenih naroda o održivom razvoju [8] u rujnu 2015. godine usvojen je Program globalnog razvoja za 2030. pod nazivom Agenda 2030 koji sadrži 17 ciljeva održivog razvoja, nazvanih i globalnim ciljevima održivog razvoja usvojenih nakon trogodišnjih procesa konzultacija u kojem su bile uključene sve društvene skupine na svim razinama. Unutar 17 globalnih ciljeva održivog razvoja u građevinskom sektoru iznimno je bitan cilj 9, a to je: industrija, inovacije i infrastruktura koji potiče izgradnju prilagodljive infrastrukture, promovira održivu industrijalizaciju i potiče inovativnost [7, 9].

Prema [10], za mostogradnju definicija održivosti znači planiranje, projektiranje, izgradnju i upravljanje mostovima koje održava ravnotežu između 3 osnovna stupa održivosti: socijalnog, ekonomskog i okolišnog. Tako poboljšanje održivosti mostova prema nekim inženjerima i znanstvenicima koji se bave materijalima, može uključivati upotrebu inovativnih materijala za stvaranje otpornijih konstrukcija, dok ga projektanti mogu vidjeti iz perspektive inovativnog projektiranja kako bi se poboljšala mobilnost zajednice [10]. Neki se mogu usredotočiti na korištenje inovativnih tehnika u izgradnji kako bi se smanjila kašnjenja u prometu, dok drugi mogu podržati trajnost radi smanjenja održavanja mostova [10].

Pristup održivosti uvijek je isprepleten s mnogo različitih segmenata društva i gospodarstva. Iako ne postoji univerzalno dogovorena definicija o pojmu održivosti, ispravan smjer bi trebao biti holistički integrirani pristup koji u odgovarajućoj mjeri i stupnju daje na važnosti pojedinim integriranim disciplinama. Ključan iskorak prema održivosti prometne infrastrukture jest osviješteno promišljanje o budućnosti i o tomu da u većini slučajeva podrazumijeva dugoročnu isplativost što njeno promicanje u velikoj mjeri otežava.

2 Primjer sustava ocjenjivanja održivosti infrastrukture

U većini zemalja je proces prepoznavanja poticanja održivog razvoja u kontekstu projekata infrastrukture u početnoj fazi prihvaćanja. Tako je u Ujedinjenom Kraljevstvu CEEQUAL (Civil Engineering Environmental Quality Assessment and Award Scheme) [11] prihvaćen kao standard na temelju kojeg se mogu procjenjivati svojstva održivosti infrastrukture. U Australiji je ISCA (Infrastructure Sustainability Council of Australia) [12] objavila IS (Infrastructure Sustainability) sustav ocjenjivanja [13]. U ovom radu bit će detaljnije razmatran Envision sustav ocjenjivanja infrastrukturnih projekata [14]. Envision je razvijen u zajedničkoj suradnji između Zofnass programa za održivu infrastrukturu na harvardskom sveučilištu [15] i Instituta za održivu infrastrukturu (ISI) [16]. ISI (Institute for Sustainable Infrastructure) [16, 17] je neprofitna obrazovna i istraživačka organizacija koja je osnovana od strane APWA (American Public Works Association), ACEC (American Council of Engineering Companies) i ASCE (American Society of Civil Engineers).

2.1 Envision sustav ocjenjivanja infrastrukture [14, 17]

Envision je nezavisni alat koji se može primijeniti na infrastrukturne projekte različitih veličina, tipova i stupnja složenosti, uključujući ceste, mostove, željeznice, zračne luke, brane, nasipe, cjevovode, parkove, dalekovode, odlagališta čvrstog otpada, postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda, telekomunikacijske kule i javne prostore. Usredotočen je na nenaseljenu infrastrukturu na kojoj u svrhu promicanja održivosti ostavlja trag sličan onom koji je LEED sustav ocjenjivanja imao za zgrade [15]. Envision sustav ocjenjivanja [17] ima holistički pristup koji donosi optimizaciju kroz interakciju različitih pristupa projektiranju i nije koncipiran kao skup pravila koja se moraju primijeniti, nego kao smjernica koja predstavlja okvir za ispravno projektiranje i promišljanje o budućnosti. Ovdje će se opisati Envision v2 sustav ocjenjivanja [17] koji je objavljen 2015.godine. U 2018.godini je objavljen i Envision v3 [18] koji za razliku od prethodne verzije ima 64 kriterija i 1000 bodova. Envision v2 sastoji se od 5 kategorija, 14 potkategorija i 60 kriterija, koji pokrivaju različite dimenzije održivosti infrastrukture. Svaki kriterij u sustavu Envision sadrži način bodovanja, opis razina dostignuća, opis kriterija, načine napredovanja do više razine dostignuća, kriterije evaluacije i potrebnu dokumentaciju, izvore i srodne kriterije u Envision sustavu ocjenjivanja. Ocjenjivanje projekta obavlja se pomoću bodovnog sustava u kojem se svaki od kriterija vrednuje s obzirom na razinu dostignuća koja je u tom kriteriju dosegnuta. Svakoj razini dostignuća su dodijeljeni bodovi u skladu s njenim procijenjenim doprinosom na održivost. Prema [17], razine dostignuća određuju razinu i kvalitetu projekta prema svakom kriteriju kako slijedi: standardna (*Conventional*) označava uobičajenu izvedbu i ne boduje se u ovom sustavu. Raza-
na dostignuća poboljšana (*Improved*) označava izvedbu koja je iznad konvencional-

nog (standardnog, uobičajenog) i lagano prelazi propisane zahtjeve. Druga razina dostignuća je usavršen (*Enhanced*) i označava održivu izvedbu koja je na dobrom putu i postoje pokazatelji da je savršena izvedba dostižna. Treća razina dostignuća je izvanredan (*Superior*) i označava održivu izvedbu koja je vrijedna pažnje, ali još nije potpuno održiva. Bodovi su osmišljeni kako bi pružili poticaje za postizanje održivog ili restaurativnog (obnovljivog) učinka. Četvrta razina dostignuća je potpuno očuvan (*Conserving*) i označuje izvedbu koja je postigla nula negativnih utjecaja, odnosno potpuno je održiva. Peta razina dostignuća je obnovljiv (*Restorative*) i označuje izvedbu koja obnavlja prirodne ili društvene sustave. Takva izvedba dobiva najvišu moguću nagradu i vrednuje se kao takva. Razina obnove nije primjenjiva na sve kriterije.

Kategorija 1: Kvaliteta života je kategorija koja se bavi procjenom fizičkih, ekonomskih ili socijalnih aspekata usklađenosti infrastrukturnih projekata s lokalnom zajednicom, od zdravlja i dobrobiti pojedinca do dobrobiti društva kao cjeline. Kategorija je podijeljena na tri potkategorije: svrha, dobrobit i društvo.

- **Svrha** je potkategorija koja ocjenjuje utjecaj infrastrukturnog projekta na funkcionalne aspekte zajednice, koji poboljšavaju kvalitetu života lokalnog stanovništva. Oglada se kroz opseg u kojem će projekt poboljšati razinu zaposlenosti, utjecati na dodatno obrazovanje i usavršavanje, potaknuti rast i razvoj lokalnog društva.
- **Dobrobit** je potkategorija koja procjenjuje dobrobit lokalnog stanovništva, uzimajući u obzir zdravstvene i sigurnosne posljedice korištenja novih materijala i /ili tehnologija. Oglada se i opsegom u kojem će se smanjiti buka i vibracije tijekom izgradnje i u fazi uporabe, korištenjem rasvjete koja neće proizvoditi svjetlosno zagađenje noću te pronalaženjem alternativnih načina transporta s naglaskom na pješačenje, nemotorna vozila te korištenje javnog prijevoza. Naglasak se stavlja i na smanjenje zagušenja prometa te poboljšanje mobilnosti, orijentacije i sigurnosti korisnika.
- **Društvo** je potkategorija koja promatra vizualni i funkcionalni utjecaj projekta tijekom projektiranja. Pri projektiranju je vrlo važno da projekt uzima u obzir svoje okruženje, okoliš i održava lokalni karakter. Posebno je bitno identificirati i očuvati povijesna i kulturna mjesta i druge srodne resurse društva te sačuvati i unaprijediti javni prostor.

Kategorija 2: Rukovodstvo je kategorija koja prepoznaje da uspješni projekti infrastrukture zahtijevaju učinkovitu implementaciju više različitih projektnih timova, kao i holistički pogled na projekt i njegov cjelokupni životni ciklus. Potreban je novi način razmišljanja i što raniji početak suradnje svih timova za projektiranje uspješnog održivog projekta koji će imati pozitivan utjecaj na svoju okolinu. Kategorija je podijeljena u tri potkategorije: suradnja, menadžment i planiranje.

- **Suradnja:** Pri postizanju najviših ciljeva i potpunog ostvarenja sinergije između sudionika projekta potrebna je što bolja komunikacija i razmjena ideja različitih pogleda na projekt kako bi suradnja rezultirala maksimalnim sinergijskim dostignućima po svim relevantnim kriterijima. Bitno je učinkovito vodstvo i predanost projektu kao i organizacijska pravila, poslovni mehanizmi, odgovarajuće metodologije i sustav upravljanja projektom koji ima cilj što uspješnije upravljanje radi sinergijskog napretka poboljšanja održivog učinka.
- **Menadžment:** Široko shvaćanje i implementiranje različitih disciplina, struka i projektnih timova zahtijeva novi oblik upravljanja projektima. U ovom području naglasak je i na integriranju projekta s već postojećom i /ili planiranom infrastrukturom u okolici.
- **Planiranje:** Dugoročni plan i aspekt u kojem će se projekt nalaziti jest gledište o kojem se raspravlja u ovom dijelu. Okruženje u kojem se projekt nalazi, kao i budući trendovi razvijanja na tom području su bitni elementi za projekt koji teži dugovječnosti i učinkovito planira svoj životni vijek. Potiče sveobuhvatnost i detaljnost dugoročnih planova monitoringa te održavanja i eliminiranje pravila, zakona i propisa koji se mogu nenamjerno suprotstaviti ciljevima ili kriterijima održivosti. Također, vrednuje stupanj do kojeg projektni tim uključuje cjelokupni životni ciklus projekta kroz poboljšanje trajnosti, fleksibilnosti i otpornosti projekta.

Kategorija 3: Raspodjela resursa je kategorija koja se bavi raspodjelom resursa u cjelokupnom životnom vijeku projekta i njihovim utjecajima na održivost projekta i cjelokupnog šireg sustava uzevši u obzir da su ti resursi većinom ograničeni. Može se raspodijeliti u tri potkategorije, a to su : materijali, energija i voda.

- **Materijali:** Životni ciklus materijala korištenih za izgradnju projekta od ključne je važnosti. Naglasak se stavlja na pametno upravljanje materijalima, u vidu smanjene ukupne potrebne količine materijala, korištenjem recikliranog materijala ili ponovno korištenje prije upotrebljenog materijala, odnosno sposobnošću ponovne upotrebe korištenog materijala na kraju životnog vijeka projekta. Isto tako, razmatra se i energija korištena za obradu i transport materijala, kao i izvor materijala s obzirom na najbližu lokaciju dostupnosti materijala zadovoljavajućih svojstava, odnosno naglasak se stavlja na minimaliziranje troškova prijevoza i utjecaja te zadržavanje regionalnih pogodnosti korištenjem lokalnih izvora. Nadalje, prihvatljivije je koristiti opremu i materijale od proizvođača i dobavljača koji implementiraju kriterije održivog razvoja.
- **Energija:** Energija iz neobnovljivih izvora fosilnih goriva koja je trenutačno u vrlo velikoj uporabi jest konačna. Smanjenje ukupne razine potrošene energije, kao i zadovoljenje preostalih energetske potreba putem obnovljivih izvora, težnja je ove potkategorije.

- **Voda:** Resursi pitke vode su ograničeni, a rast populacije na Zemlji kao i promjena klime stavlja budućnost pitke vode pod upitnik. Stoga je smanjenje ukupne potrošnje vode i recikliranje vode, kao što je oborinska voda i onečišćena voda koja bi mogla biti korištena za mnoge funkcije bez smanjenja ukupnog vodenog resursa jest ključan aspekt ove potkategorije.

Kategorija 4: Prirodni svijet - Projekti infrastrukture utječu na prirodni svijet oko sebe. Kroz ovu kategoriju pokušavaju se minimalizirati negativni učinci projekta infrastrukture na prirodni svijet, kroz sinergijski pozitivan pristup projekta na prirodni svijet u svom okruženju. Sastoji se od tri potkategorije: smještaj, zemlja i voda, biološka raznolikost.

- **Smještaj:** Ova potkategorija upućuje na adekvatne načine smještaja samog projekta kojemu je cilj izbjeći zemljište koje je identificirano kao zemljište visoke ekološke vrijednosti. Naglasak se također stavlja na očuvanje područja geološke ili hidrološke vrijednosti i izbjegavanje prekida prirodnih ciklusa, kao što je hidrološki ciklus. Ako je nemoguće izbjeći osjetljiva mjesta, preporučeno je učiniti ih blažima za očuvanje prirodnog svijeta. Preporučeno je upotrebljavati već korišteno zemljište radi sprječavanja daljnjeg oštećenja tog okoliša, identificirati i zaštititi vrijedna poljoprivredna područja, postavljanje tamponskih zona oko močvarnih staništa, obala i vodenih objekata.
- **Zemlja i voda:** Ova potkategorija posvećuje dodatnu pažnju sprječavanju onečišćenja izbjegavanjem zagađivača i pesticida kao i poremećajima hidroloških i hranidbenih ciklusa. Svaki projekt i mjesto dijele odgovornost za zaštitu kvalitete većeg sustava. Naglasak je na smanjenju negativnog utjecaja infrastrukturnog projekta na količinu i kakvoću oborinskih voda, te očuvanje slatkovodnih resursa kroz izvedbe, planove i programe za sprječavanje i monitoring površinskih i podzemnih voda od onečišćenja.
- **Biološka raznolikost:** Projektiranje infrastrukturnih projekata trebalo bi promicati očuvanje biološke raznolikosti zaštitom ugroženih biljnih i životinjskih vrsta i staništa, povezivanje staništa, izbjegavanje invazivnih vrsta i pažljivo odabiranje novih vrsta vegetacija na lokaciji. Infrastrukturni projekt ne bi smio nepovoljno utjecati na močvare, koje vrlo često osiguravaju ekosustave koji podržavaju visok stupanj prirodne biološke raznolikosti. Ova potkategorija potiče obnavljanje tla koja su narušena tijekom gradnje kako bi se uravnotežile ekološke i hidrološke funkcije kao i održavanje ekosustava potoka, močvarnih područja, vodenih površina i njihovih obalnih područja.

Kategorija 5: Klima i rizici je kategorija koja je podijeljena u dvije potkategorije: emisije i otpornost.

- **Emisije:** Cilj potkategorije emisije je promicanje razumijevanja za smanjenje emisija stakleničkih plinova i onečišćujućih tvari u zrak kao što su ugljični monoksid, sumporov oksid, dušikov oksid i drugi, za vrijeme životnog ciklusa projekta.
- **Otpornost:** Potkategorija otpornost podrazumijeva sposobnost prilagodbe na promjenjive dugoročne uvjete, kao porast razine mora ili klimatske promjene, te sposobnost izdržavanja kratkoročnih rizika, kao što su poplave ili požari. Prepoznavanje potencijalnih vrsta rizika i njihove pripadne vjerojatnosti događanja potencira njihovu uključenost u izradu projekata manje osjetljivih na promjene. Unutar svake od 5 ključnih kategorija može se pribrojiti dodatni kriterij koji nagrađuje izuzetne izvedbe koje su iznad očekivanja u toj kategoriji. Time se ocjenjuju inovativna rješenja ili primjene inovativnih metoda koje unaprjeđuju trenutno stanje područja održive infrastrukture. Tako se u kategoriji kvaliteta života može dobiti dodatnih 8 bodova, rukovodstvu 6 bodova, raspodjeli resursa 8 bodova, prirodnom svijetu 9 bodova, a kategoriji klima i rizici dodatnih 5 bodova. Ukupno u svim kategorijama, ocjenjivanjem 60 kriterija prema 5 razina dostignuća maksimalno je moguće dobiti 809 bodova. Kriteriji iznimne izvedbe donose dodatne bonus bodove koji mogu biti dodani kategoriji ili ukupnom broju bodova. U većini kriterija, niže razine moraju biti postignute kako bi se zadovoljile više razine. Bodovi se zbrajaju kako bi se dobio ukupan broj bodova i valorizirao projekt koji je prijavljen za Envision nagradu. Tako 20 % bodova donosi brončanu, 30 % srebrnu, 40 % zlatnu, i 50 % bodova platinastu Envision nagradu za održivost infrastrukturnog projekta. Za projekte koji idu na provjeru za dobivanje Envision nagrade treba biti dostavljena odgovarajuća dokumentacija opisana u kriterijima ocjenjivanja koja podržava razinu dostignuća koja je odabrana. Kriteriji se mogu izostaviti ako nisu primjenjivi na projekt, ali to zahtijeva objašnjenje zašto kriterij nije primjenjiv na projekt. ENV SP (eng. *Envision Sustainability Professional*) ovlaštene su inženjeri za korištenje Envision-a koji rade u projektnom timu i pomažu pri postizanju viših razina održivosti i dokumentiranju održivosti projekta. Svatko može koristiti Envision za svoj projekt, ali ENV SP mora biti uključen u projekt kako bi projekt bio potvrđen i prihvatljiv za dobivanje Envision nagrade za održivost. Nakon prijave projekta za dobivanje Envision nagrade, kvalificirani ISI-ov stručnjak provjerava i potvrđuje razine dostignuća, potrebnu dokumentaciju i prihvaća ili ne prihvaća rezultate ocjenjivanja koje je poslao projektni tim.

2.1.1. Ohio River Bridges – East End Crossing [19]

Prvi most koji je dobio Envision Platinum nagradu je Ohio River Bridges – East End Crossing. ORB-EEC [19, 20] je dobio tu nagradu kao prvi u mnogočemu, uključujući prvi projekt koji uključuje autocestu, prvi riječni most, prvi projekt između dvije države i prvi cestovni tunel koji je dobio nagradu Envision. Prema [19], značajna dostignuća ovaj projekt je postigao u 3 kategorije. U kategoriji kvalitete života predviđa se značajno stvaranje novih radnih mjesta tijekom gradnje i nakon završetka projekta. Učinkovitija prometna povezanost i smanjenje zagušenja prometa u središtu Louisillea trebalo bi poboljšati mobilnost poslovnog okruženja. Projekt će proširiti kapacitet regije za rješavanje predviđenog povećanja broja stanovnika te su uvedene i inovativne mjere za zaštitu zdravlja i sigurnosti kako bi zaštitili građevinske radnike tijekom izgradnje. Projektni tim održao je niz javnih sastanaka kako bi upoznao javnost s projektom. U kategoriji rukovodstvo, budući da projekt prelazi preko granice dviju država, projektni tim morao je proučiti razlike u zakonima i propisima o zaštiti okoliša, kao i pravila za promet s obje strane rijeke Ohio. Tijekom trajanja projekta održavani su javni sastanci, projektantskih timova s različitim grupama sudionika i organizacijama iz obje države koje su pomogle oblikovati projekt. Projektni tim uključio je izmjene u projekt na temelju povratnih informacija sudionika, uključujući ugrađivanje barijera buke i estetska poboljšanja poput ukrasnih ograda, rasvjete i pješačkih ograda kako bi se sačuvali povijesni elementi područja. U kategoriji klima i rizik projektni tim je uzeo u obzir procjene klimatskih promjena za identifikaciju potencijalnog rizika u životnom vijeku projekta. Provedene su mnoge mjere kako bi se zaštitio od tih rizika, uključujući minimalnu niveletu za koridor na 100-godišnji povratni period poplava za potporne zidove i mostove autoceste i 500-godišnji povratni period poplava za tunel, cestu i ovješeni most. U izradi projekta uzeto je u obzir nekoliko izvanrednih mogućih opasnosti poput požara, potresa i nesreća. Nekoliko je strategija uključeno u projektiranje radi zaštite od tih opasnosti, uključujući tunel za hitne slučajeve i projektiranje projekta izvan postavljenih zahtjeva kako bi mogao izdržati potencijalno moguće potrebe.

2.1.2. New Champlain Bridge Corridor [21]

New Champlain Bridge Corridor je prvi most u Kanadi i drugi most u Sjevernoj Americi koji je dobio Envision nagradu. Uključuje novi 3,4 km dug most koji povezuje gradove Montreal na zapadu i Brossard na istoku, zamjenu postojećeg mosta, kao i rekonstrukciju autoceste duž A-15 i A-10 u Montrealu i Brossardu [21]. Budući da se očekuje životni vijek od 125 godina, sustav za odvodnju otpadnih voda projektiran je da izdrži moguće povećanje kišnice od klimatskih promjena. Više od 40 posto građevinskog otpada od rušenja mosta i cesta, ponovno je korišteno na gradilištu, a reciklirano je 54 posto, pa je samo jedan posto otpada završio na odlagalištu. To je

smanjilo kamionski promet, kao i emisije stakleničkih plinova. Da bi se izbjegao neizbježni gubitak ribljih staništa, močvarnih područja i odmorišta ptica, vlada je uspostavila projekte usporedne kompenzacije za njihovu obnovu na okolnom području. Most potiče održivi razvoj kao jedan od najprometnijih prijelaza u Kanadi koji ima godišnji promet između 40 i 50 milijuna putnika i 20 milijardi dolara u međunarodnoj trgovini. Poboljšanja mobilnosti koju donosi novi most u odnosu na postojeći Champlain Bridge imat će izravan pozitivan utjecaj na gospodarstvo, smanjujući vrijeme putovanja za automobile i kamione te pružajući pouzdane opcije javnog prijevoza. U kategoriji kvaliteta života projekt poboljšava dostupnost nemotornog prijevoza i javnog prijevoza uključivanjem višenamjenskog puta za pješake i bicikliste. Poboljšava mobilnost društva osiguravajući sigurnije putovanje i poboljšavajući učinkovitost prometnog toka te poboljšava puteve za pješake radi boljeg povezivanja sjevernih i južnih dijelova tog područja. U kategoriji rukovodstvo projektni tim je implementirao prošireni sustav upravljanja kvalitetom okoliša (EQMS) koji uključuje društvene aspekte kako bi se poboljšala održiva izvedba projekta kroz široki raspon društvenih, ekoloških, ekonomskih i pokazatelja kvalitete. EQMS je razvijen u skladu s normama ISO 14001 i 9001 za upravljanje okolišem i kvalitetom. Projekt je premašio najvišu razinu dostignuća u sustavu ocjenjivanja u kategoriji kvalitete života, zarađivši bodove za izuzetna postignuća. Nadalje, projekt provodi novi koncept odmrzavanja kako bi ublažio rizik od akumulacije leda na ovišenom dijelu mosta i njegov pad na most ispod. Izgradnja je iznimno složena, a plovni kanal nije dopuštao nikakve privremene konstrukcije ili terete jer nikakva djelatnost nije smjela ometati pomorski promet. Zbog toga je uspostavljen i inovativni pristup gradnje kako bi se mogla izvesti bez ometanja pomorskog prometa.

3 Primjer valorizacije održivosti spregnutih mostova

3.1 SBRI + : Valorizacija spoznaja o održivosti spregnutih mostova u izgrađenom okolišu [22, 23]

Projekt SBRI Održivi spregnuti mostovi u izgrađenom okolišu trajao je od 2009. do 2012. godine, analizirani su spregnuti cestovni mostovi holističkim pristupom. Projekt (SBRI+) ima za cilj valorizaciju, diseminaciju i proširenje metode razvijene u SBRI projektu za napredne primjene[22]. Prema [22], tri su glavne analize: kvaliteta okoliša koja predstavlja analizu emisija u životnom ciklusu (LCA), ekonomska kvaliteta analize troškova životnog ciklusa (LCC), te socijalna i funkcionalna kvaliteta analize životnog ciklusa sa socijalnog aspekta (LCS). Mostovi se projektiraju za uporabni životni vijek od više od 100 godina, i zbog toga posebnu pozornost treba obratiti na ponašanje u životnom ciklusu u odnosu na različite procese. Cilj je projekta bio uspostaviti okvire za procjenu i usporedbu održivosti različitih tipova mostova u ra-

nim fazama projektiranja. Procjena održivosti provedena je u skladu s najnovijim europskim normama CEN TC 350 i ISO normama 14040 [24] i 14044 [25]. Ponašanje u životnom ciklusu analizira se kroz moguće različite tipove degradacije kao što su karbonatizacija (inicijacija korozije armature), korozija čeličnih nosača i umor te odgovarajuće intervale i metode pregleda i održavanja. Tijekom faze korištenja sastavljen je popis strategija održavanja [26] za različite europske zemlje. U ovom su istraživanju razmotrene 3 vrste scenarija održavanja: standardni scenarij, scenarij nedostatka novca i scenarij produženog životnog vijeka. Za pojedine elemente mosta je dan prosječni vijek trajanja (godine), kao i prosječne učestalosti aktivnosti održavanja ili popravaka za sva 3 moguća scenarija održavanja te se pretpostavlja da je prosječni vijek trajanja svakog konstrukcijskog i/ili nekonstrukcijskog elementa mosta isti za sve scenarije. Dakle, prosječni vijek trajanja je isti za sve scenarije, dok je pretpostavljena učestalost radova održavanja/popravaka drugačija, odnosno za scenarij nedostatka novca prolongirana je, a za scenarij produženog životnog vijeka dogovara se tijekom 80. godine životnog vijeka za dodatnih 30 godina, odnosno 130 godina trajanja. U analizi okoliša u životnom ciklusu uključene su sve faze životnog ciklusa mostova, od nabave sirovina, proizvodnje materijala i izgradnje konstrukcije, faze korištenja mosta do kraja životnog vijeka (uklanjanja konstrukcije i recikliranja materijala). Prijevoz materijala i opreme je uključen. Metodologija za procjenu utjecaja koristi sljedećih 7 indikatora okoliša: potencijal globalnog zatoplivanja (eng. *Global Warming Potential* – GWP), potencijal zakiseljavanja (Acidification Potential – AP), potencijal eutrofikacije (eng. *Eutrophication Potential* – EP), fotokemijski potencijal stvaranja ozona (eng. *Photo Ozone Creation Potential* – POCP), potencijal razgradnje ozonskog omotača (eng. *Ozone Depletion Potential* – ODP) i potencijal abiotičkog iscrpljivanja (eng. *Abiotic Depletion Potential* – ADP).

Prema [22], u trošak cijelog životnog vijeka (WLC) ubraja se nekonstrukcijski trošak, trošak životnog ciklusa (LCC), zarada i indirektni troškovi. Dalje se trošak životnog ciklusa (LCC) dijeli na izgradnju, održavanje, korištenje, posjedovanje i kraj životnog vijeka.

Faza izgradnje uključuje troškove vezane uz izgradnju čelično-betonskog spregnutog mosta i uglavnom uključuje troškove za temelje, donji ustroj s upornjacima, pilote i ležajeve, gornji ustroj s čeličnim nosačem/sandukom (za spregnuti most), betonsku ploču i opremu. Troškovi trebaju uključivati sve materijale i troškove rada koji su potrebni za svaku komponentu. Većina građevinskih materijala troši energiju za proizvodnju i transport. Ovaj se aspekt uzima u obzir u [27] množenjem svih troškova materijala za gradnju i popravke s koeficijentom zbog potrošnje energije za proizvodnju i transport. Korištenje neobnovljivih materijala uzima se u obzir uključivanjem troškova reprodukcije ili ponovne upotrebe materijala kada je konstrukcija uklonjena. U **fazi korištenja** pregledi mostova su bitni za utvrđivanje intervencijskih strategija. Strategije pregleda (intenziteti i učestalosti pregleda) mogu se razlikovati

ovisno o klimatskim uvjetima i strategijama prioriteta koji odgovaraju svakoj zemlji (Woodward 1997). Za **kraj životnog vijeka** pretpostavlja se da će čelična konstrukcija biti ponovno korištena, dok se betonski i bitumenski ostali dijelovi spregnutog mosta odvoze na područja za odlaganje otpada. Troškovi u ovom slučaju trebaju uzeti u obzir troškove demontaže mosta (rad, oprema, signalizacija na cesti), trošak prijevoza i trošak odlaganja materijala i/ili prihoda zbog recikliranja materijala. Budući da su troškovi u LCC analizi nastali u različitim vremenskim točkama, potrebno je pretvoriti sve vrijednosti troškova u vrijednost u zajedničkoj vremenskoj točki. Postoji nekoliko metoda od kojih su neke: metoda povrata (eng. *The payback method*), ekvivalentni godišnji troškovi (eng. *The equivalent annual costs*), interna stopa povrata (eng. *The internal rate of return*), pristup neto sadašnje vrijednosti (eng. *The net present value*). Za analizu socijalnih komponenata životnog ciklusa razmatraju se obvezni i dodatni indikatori. U obvezne indikatore ulaze troškovi kašnjenja vozača, troškovi rada vozila i troškovi prometnih nesreća. Mogu se uzeti u obzir i utjecaji zaobilaženja u slučaju da promet mora biti zaustavljen i preusmjeren na alternativnu cestu. Dodatno vrijeme i dodatna duljina ceste također se mogu uzeti u obzir. Prvi dodatni indikator je buka koja može biti važna ako se mjesto radova nalazi blizu osjetljivog područja ili se radovi obavljaju noću, a drugi estetika ako je namjera da most ima estetsku funkciju osim svoje uobičajene funkcije. Ova dva indikatora obično se ne procjenjuju prema pristupu koji se temelji na životnom ciklusu i oba su subjektivna, što podrazumijeva drugi pristup za njihovu kvantifikaciju i interpretaciju. U ovoj analizi potrebno je izračunati i trenutačni ili budući prosječni dnevni promet (eng. *Average daily traffic* – ADT) izražen u vozilima/danu. Zbog čimbenika kao što su rast stanovništva i gospodarski prosperitet, obujam prometa na mostu može se povećati svake godine i procjenjuje se izrazom: $ADT_t = ADT_0 \times (1 + r_{tg})^{year_t - year_0}$, gdje je ADT_t – prosječni dnevni promet koji se koristi u analizi u godini t (vozila/danu), r_{tg} – očekivana rata prirasta prometa, $year_t$ – godina u kojoj se ADT treba izračunati, $year_0$ – godina u kojoj je ADT izmjeren.

Višekriterijska analiza: Pri uspoređivanju prednost imaju metode nadmašivanja (eng. *Outranking based methods*) u odnosu na metode skupljanja (eng. *Aggregating methods*). Metoda usvojena u ovom istraživačkom projektu je metodologija organizacije prioriteta rangiranja procjene obogaćivanja (eng. *Preference Ranking Organization Methodology of Enrichment Evaluation* – PROMETHEE). Pregled metodologije i primjene PROMETHEE može se naći u [28]. Pri korištenju metode PROMETHEE, potrebno je osigurati dodatne informacije između kriterija i unutar svakog kriterija. Informacije između kriterija dane su težinskim faktorima ($w_j = 1, 2, \dots, k$) koji predstavljaju relativnu važnost svakog kriterija. Za analizu se razmatraju različiti scenariji: scenarij 1 uzima u obzir jednaku važnost za tri glavna kriterija: ekološki, ekonomski i troškove korisnika (1/1/1), scenarij 2 uzima u obzir veću važnost kri-

terija okoliša u odnosu na ekonomski i troškove korisnika (2/1/1), scenarij 3 uzima u obzir veću važnost ekonomskog kriterija u odnosu na ekološki i troškove korisnika (1/2/1), scenarij 4 uzima u obzir veću važnost za troškove korisnika u odnosu na ekološke i ekonomske kriterije (1/1/2).

Razvijen je i SBRI-TOOL programski alat u operativnom sustavu iOS. U programu će se korisniku dati tri unaprijed definirana scenarija održavanja, ovisno o životnom vijeku različitih komponenti mosta. Isto tako, napravljeni su dostupni scenariji za različite materijale za kraj životnog vijeka. Razmatrani su sljedeći slučajevi: slučaj A – nadvožnjaci na autocestama, slučaj B – veliki cestovni mostovi, slučaj C1 – cestovni mostovi s više raspona, slučaj C2 – mali cestovni mostovi s jednim rasponom. Prema [23] SBRI+, u Priručniku za projektiranje II, glavni cilj su daljnje proširene analize mostova ne samo standardnih situacija pločastih mostova koji su proučavani u prethodnom projektu [22] nego također proučavanje izgrađenih mostova diljem Europe s realnim podacima i postojećim situacijama mostova kao što su uvjeti prometa, pregleda i održavanja. Stoga je analizirano nekoliko tipova mostova i inovacija: slučaj D - integralni nadvožnjak preko autoceste gdje su uzeti u obzir i vruće cinčani nosači, i slučaj E - precebeam most (montažni spregnuti nosač) s inovativnom posmičnom vezom.

4 Zaključak

U kontekstu održivog razvoja koje implicitno sadrži i projektiranje održive infrastrukture, pristup projektiranju nadilazi uobičajene proračune pouzdanosti, otpornosti, stabilnosti kao i kriterij najniže početne cijene projekta. Ispravan način održivog projektiranja mostova se treba promatrati kroz interakciju aspekata okoliša, društva i ekonomije, pri čemu je njihova interakcija nužna jer svi aspekti trebaju biti zadovoljeni u određenoj mjeri, odnosno imati pozitivan utjecaj na sustav. Mostovi su dugotrajne građevine i iznimno je važna ravnoteža između ovih dimenzija implementirana kroz cijeli životni vijek projekta, od projektiranja, izgradnje, korištenja, do uklanjanja i recikliranja. Pri tome treba voditi računa o promjeni uvjeta tijekom životnog vijeka i obratiti pozornost na projektiranje sa što manjom osjetljivošću na faktore koji bi mogli biti kroz dugoročni period promijenjeni, a dosad su prepoznati kao takvi, kao što su klimatski uvjeti, porast broja stanovnika, ograničeni resursi, povećanje prometnog opterećenja na mostove i drugi. Možemo zaključiti da je održivo projektiranje sustav koji teži prema ravnoteži kroz interakciju tri osnovne dimenzije održivosti, i koji se kao takav može kvantitativno vrednovati što je bitan element u daljnjem razvijanju ovakvog pristupa projektiranju. Tehnologija gradnje mostova bi trebala biti takva da što manje ometa već postojeći promet, odnosno njegove korisnike, ne stvara gužve, zagušenja prometa i dodatne troškove za korisnike. Most bi s obzirom na projektirani dugi životni vijek trebalo projektirati na način da svojom konstrukcijom “dopusti” što manje oštećenja i degradacije, kako bi zahtijevao što

manje intervencija za održavanjem i popravcima, a time pridonio smanjenju negativnih utjecaja na okoliš kroz smanjenje emisija štetnih plinova te racionalnijih procesa proizvodnje i potrošnje materijala, ekonomiju kroz smanjenje troškova i društvo kroz neometanje prometa, sigurnost i mobilnost korisnika i dodatnih troškova. U radu su prikazana dva različita pristupa ocjenjivanju održivosti mostova. Oba zahtijevaju dostupnost brojnim podacima o samom infrastrukturnom projektu, ali i šire. Drugi pristup specijaliziran je za različite varijante mostova i koristi holistički pristup analiza životnog ciklusa, te ih rangira po višekriterijskoj analizi. Budući da se prvim pristupom potiču inovativna rješenja pri projektiranju infrastrukturnih projekata koja kao krajnji cilj imaju ne samo smanjivanje negativnih utjecaja projekta na koncept održivosti, već koja po mogućnosti postaju obnovljiva (taj pristup postaje vrlo aktualan). Stoga će se daljnja istraživanja fokusirati upravo na navedeni pristup i njihovu implementaciju u specijalizirani pristup projektiranja mostova kao dijela prometne infrastrukture, koja će se po mogućnosti primijeniti na različite nosive sustave, materijale i/ili elemente mosta.

Literatura

- [1] Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment, <http://www.un-documents.net/unchedec.htm>, Stockholm, Sweden, 5-16 June 1972.
- [2] Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- [3] United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, 3-14 June 1992, The Earth Summit, <http://www.un.org/geninfo/bp/enviro.html>
- [4] United Nations Millennium Declaration, <http://www.un.org/millennium/declaration/ares552e.htm>
- [5] RH ministarstvo vanjskih i unutarnjih poslova, <http://www.mvep.hr/hr/vanjska-politika/multilateralni-odnosi0/globalne-teme/odrzivi-razvoj/>
- [6] World Summit on Sustainable Development (WSSD), Johannesburg, <https://www.earthsummit2002.org/>
- [7] Odrad.hr, Globalni ciljevi održivog razvoja do 2030., Priredila: Lidija Pavić-Rogošić, Suradnice: Višnja Jelić Mück, Martina Jagnjić, Zagreb, studeni 2015.,
- [8] 2030 Agenda for sustainable development, 17 goals to transform our world, UN, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>
- [9] Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
- [10] Primer on The Sustainability Considerations for Bridges; Transportation Association of Canada; October 2015

- [11] Civil Engineering Environmental Quality Assessment and Award Scheme, UK, <http://www.ceequal.com/>
- [12] Infrastructure Sustainability Council of Australia (ISCA), <http://www.isca.org.au/>
- [13] Infrastructure Sustainability Rating tool Materials Calculator Guideline, developed by Edge Environment for the Infrastructure Sustainability Council of Australia, ISCA, 20/02/2015
- [14] Envision rating system, <https://sustainableinfrastructure.org/envision/>
- [15] Zofnass Program for Sustainable Infrastructure at the Harvard University Graduate School of Design, <https://research.gsd.harvard.edu/zofnass/>
- [16] Institute for sustainable infrastructure (ISI), <https://sustainableinfrastructure.org/>
- [17] Envision rating system for sustainable infrastructure v2, 2015. <https://sustainableinfrastructure.org/portal/files/GuidanceManual.pdf>
- [18] Envision sustainable infrastructure framework, version 3, 2018. , <https://sustainableinfrastructure.org/envision-version-3/>
- [19] Ohio River Bridges – East End Crossing Earns the Envision Platinum Award, <https://sustainableinfrastructure.org/envision/project-awards/ohio-river-bridges-east-end-crossing/>
- [20] WVB East End Partners, <http://eastendcrossing.com/>
- [21] New Champlain Bridge Corridor, <https://sustainableinfrastructure.org/envision/project-awards/new-champlain-bridge-corridor/>
- [22] SBRI +: Valorizacija spoznaja o održivosti spregnutih mostova u izgrađenom okolišu - Priručnik za projektiranje I, Opće informacije i riješeni primjeri, urednici hrvatskog izdanja: Dujmović, D., Lukačević, I., 1. izdanje, travanj 2018.,
- [23] SBRI +: Valorizacija spoznaja o održivosti spregnutih mostova u izgrađenom okolišu - Priručnik za projektiranje II, Napredne primjene, urednici hrvatskog izdanja: Dujmović, D., Lukačević, I., 1. izdanje, travanj 2018.,
- [24] ISO 14040 – Environmental management – life cycle assessment – Principles and framework, Geneva. Switzerland: International Organization for Standardization, 2006
- [25] ISO 14044 - Environmental management – life cycle assessment – Requirements and guidelines, Geneva. Switzerland: International Organization for Standardization, 2006
- [26] EUR 26322, Sustainable steel-composite bridges in built environment (SBRI), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013.
- [27] Salokangas, H.: ETSI PROJECT (STAGE II) Bridge Life CYCLE Optimisation., Espoo, Finland.: Helsinki University of Technology Publications in Bridge Engineering, TKK-R-BE3.,2009.
- [28] Behzadian, M., Kazemzadeh, R., Albadvi, A., Aghdasi, M.: PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications, European Journal of Operational Research, 200 (2010), pp. 198-215.

Utjecaj trenja na ponašanje i rad predgotovljenih kompozitnih sustava drvo – nosivo staklo

Nikola Perković¹, prof.dr.sc. Vlatka Rajčić²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, nperkovic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, vrajcic@grad.hr

Sažetak

Osnovni koncept projektiranja građevina u potresnim područjima jest zadovoljavanje duktilnosti i dostatne disipacije energije cjelokupnog sustava. Kombinacijom drva i nosivog stakla osmišljen je sustav u kojem će svaki materijal prenositi opterećenje, a u međusobnoj interakciji konstitutivnih elemenata biti otporan na potres. Razvijen je sustav u kojem se staklo direktno oslanja na drveni okvir, a prijenos opterećenja se događa kontaktom dvaju materijala i sile trenja između njih. Pri potresnom opterećenju, trenje između stakla i drva je važan čimbenik koji utječe na ponašanje i rad kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo.

Cljučne riječi: kompoziti, drvo, nosivo staklo, potres, trenje, FEM analiza

Influence of friction on the behaviour and performance of prefabricated wood – bearing glass composite systems

Abstract

The basic concept of seismic design of buildings is to ensure proper ductility and sufficient energy dissipation of the entire system. The combination of wood and bearing glass was used to form a system in which each material transmits the load while also acquiring seismic resistance through interaction of constitutive elements. In this newly developed system, glass leans directly onto the wooden frame, and load is transferred through contact and friction between the two materials. The friction between glass and wood is a significant factor in seismic design, as it influences behaviour and performance of the wood – glass composite system.

Key words: composites, wood, load-bearing glass, earthquake, friction, FEM analysis

1 Uvod

U posljednjih nekoliko desetljeća došlo je do naglog razvoja stakla kao nosivog materijala. Nosivo staklo u kombinaciji s drvenim okvirom predstavlja novu generaciju nosivog kompozitnog sustava koji ima predispozicije za dobro ponašanje prilikom potresa, a istovremeno je energetski efikasno i isplativo, estetski prihvatljivo te ima dobre nosive karakteristike [1]. Iako postoje brojne norme vezane za proizvode od stakla (npr. [2, 3]), posebna europska norma samo za nosivo staklo je u pripremi te su dane tek okvirne smjernice za uporabu i dimenzioniranje elemenata od stakla [4]. Zasad su u uporabi prednorme prEN 13474 [4, 5] koje su osnova za stvaranje zajedničke norme. Modeli proračuna i europske norme podrazumijevaju uporabu staklenih panela kao sekundarnih elemenata [8], što kod proračuna otpornosti konstrukcije znači da pozitivni utjecaj tih elemenata pri prijenosu poprečnih opterećenja uzrokovanih potresom moramo zanemariti [7]. U praksi postoje razne vrste sustava i konstrukcija drvenih zgrada kao što su panelni i okvirni sustavi, no još uvijek, razvojem se mogu postići bolje značajke sustava, naročito za gradnju u potresnim područjima u skladu s novom generacijom propisa [10]. Područje primjene ovakvog sustava gradnje bilo bi gradnja nižih do srednje visokih poslovnih i stambenih zgrada, nadogradnja postojećih armiranobetonskih i zidanih zgrada brzo izvedivim montažnim etažama koje su predgotovljene u tvornici. Osnovni cilj istraživanja je unaprijediti spoznaje o nosivim kompozitnim sustavima drva s nosivim staklom te osmisliti koncept kompozitnog sustava koji će biti primjenjiv u stambenim zgradama.

Sustav će biti analiziran s aspekta nosivosti, uporabivosti, stabilnosti, ali i energetske učinkovitosti. Gradnja drvom je vrlo brza i u potpunosti pogodna prethodnoj pripremi u tvornicama, a u sveukupnom životnom rasponu (cradel to cradel – kolijevka do kolijevke) pokazuje izuzetno dobre rezultate u smislu ekonomičnosti i održivosti te smanjenog CO₂ [9]. S obzirom na kompleksnost kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo i intencije prikazivanja što realnijeg ponašanja i karakteristika takvih sustava, istraživanje je podijeljeno u dvije cjeline: laboratorijska ispitivanja i istraživanja na numeričkim modelima. Također, planira se pristupiti LC analizama.

Definiranje kontakta između stakla i drva, kao i spajanje drvenih dijelova okvira, detalji su kojima treba posvetiti najveću pažnju, jer upravo način spajanja ovih elemenata uvelike određuje ponašanje cijelog kompozitnog sustava [6]. Uobičajen način spajanja nosivog stakla i drvene konstrukcije je ljepilima i različitim vrstama mehaničkih spajala [1]. Uporabom čeličnih mehaničkih spajala javljaju se komplicirana rješenja izvedbe i detalji koji oštećuju rub stakla i najosjetljiviji je dio staklenog elementa. Uporabom ljepila može se uspostaviti dobra veza, no postavlja se pitanje o trajnosti takvih sustava. Uz navedene probleme, prilikom potresnog opterećenja dolazi do oštećenja konstrukcije upravo na mjestu spojeva, a time i otkazivanja ci-

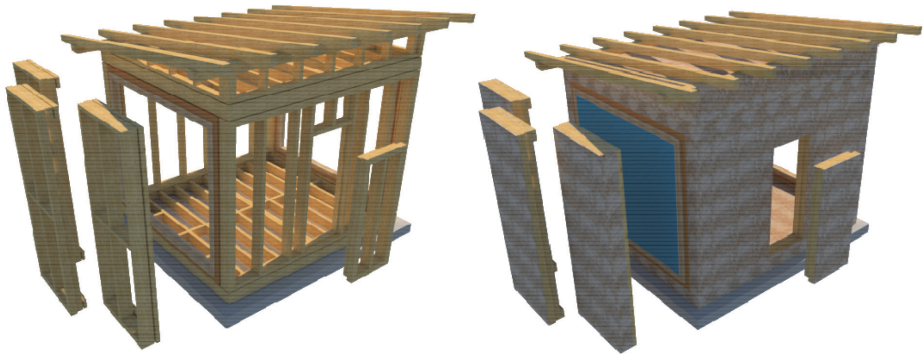
jelog nosivog sustava [1, 13]. Radi rješavanja spomenutog problema i što bolje disipacije energije prilikom potresnog opterećenja, razvijen je sustav gdje je nosivo staklo umetnuto u drveni okvir bez dodatnih mehaničkih spajala i ljepila. Sustav je zamišljen tako da se omogući djelomično slobodno kretanje stakla u drvenom okviru, a stabilnost stakla osigurava se dodatnim drvenim letvama. Stoga, opterećenje se prenosi direktnim kontaktom, tj. trenjem između dvaju elementa [1, 6, 7, 16].

U prethodnim ispitivanjima vidjelo se da do otkazivanja kompozitnog sustava dolazi u kutu drvenog okvira [1]. Zbog djelomično slobodnog kretanja, nosivi stakleni paneli ostaju neoštećeni, što je od iznimne važnosti u ovakvom kompozitnom sustavu jer su drveni elementi lako zamjenjivi, a mehaničke karakteristike i svojstva nosivog stakla zadržani. U nastavku rada, kroz projekt "Vetrolignum" pod vodstvom prof. dr.sc. Vlatke Rajčić, obrađuje se problematika trenja, daju se rezultati istraživanja te smjernice za daljnja istraživanja.

2 Prototip višenamjenskog kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo

Glavni cilj projekta je razviti, osmisлити i konstruirati novi kompozitni sustav koji će se koristiti kao neovisna predgotovljena konstrukcijska komponenta za građenje u seizmički aktivnim područjima. Svrha istraživanja je projektiranje kompozita i konstruiranje detalja spajanja koji nemaju negativan utjecaj na nosivo staklo, te razvijanje sustava sa visokim stupnjem disipacije energije. Preliminarna istraživanja pokazuju da se određeni kompozitni sustavi mogu koristiti u seizmičkim aktivnim područjima (kao što je Hrvatska) [1, 6, 8, 13, 14] ali optimizacija sustava i parametarska analiza još nisu napravljeni.

Posljednjih godina, zahvaljujući suradnji Sveučilišta u Zagrebu i Sveučilišta u Ljubljani, provedeno je preliminarno ispitivanje kompozitnog sustava drveno-nosivo staklo pri monotono statičkom i cikličnom opterećenju. Osnovni zaključci iz prethodnih istraživanja [1, 6, 12-14] navedeni su u ovom radu. Predviđeno je istraživanje i razvoj energetske učinkovitih kompozitnih sustava u trogodišnjem projektu pod nazivom VETROLIGNUM (prototip višenamjenskih kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo) koji financira Hrvatska zaklada za znanost. Ovaj projekt će nadograditi znanje vezano uz dimenzioniranje konstrukcije te istražiti nove načine povezivanja nosivih elemenata i napraviti studiju optimizacije određenih dijelova panela u svrhu što bolje energetske učinkovitosti. Studije omogućuju zaključke potrebne za izradu prototipa kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo (slika 1.), koja bi se mogla ugraditi u stvarnu zgradu što je i krajnji cilj projekta. Također, ova vrsta hibridnog elementa može se koristiti kao neovisni element u izgradnji drvenih konstrukcija, privremeno ili trajno ojačanje i stabiliziranje elemenata postojećih objekata i objekata kulturne baštine, te kao element za izgradnju višenamjenskih i adaptivnih fasadnih sustava.



Slika 1. 3D prikaz – prototip kompozitnog sustava

3 Ispitivanje trenja između drva i stakla

3.1 Motivacija za istraživanje

Istraživanje trenja između drva i stakla od ključne je važnosti za razumijevanje rada cijelog kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo, u kojem stakleni panel može klizati u drvenom okviru. Upravo klizanje, odnosno trenje između stakla i drva jedan je od činitelja koji prenose dio horizontalnog opterećenja [6]. Sustav za ispitivanje je sastavljen od jednog uzorka laminiranog ili IZO stakla koji je ugrađen između dva drvena elementa. Pozicioniranje stakla postiglo se izradom dodatnih drvenih letvica koje sprječavaju bočni pomak stakla, no ne pritišću ga bočno, dakle, ne utječu na silu trenja. Na temelju testa, određujemo silu trenja na kontaktu drvo-staklo za određeni bočni pritisak, tj. normalnu silu. Kao rezultat toga dobivamo koeficijent trenja koji se može koristiti za numeričko modeliranje kontakta između drva i stakla u računskom modelu. Numerički analiza je provedena programskom podrškom ANSYS.

3.2 Opis i izrada uzoraka

Sustav za ispitivanje trenja sastoji se od drvenih CLT elemenata, staklenih uzoraka te čeličnih elemenata (unos bočne sile). Radi optimiziranja, izrađeni su uzorci stakla različite vrste i debljine.

3.2.1 Izrada staklenih uzoraka

Izrađeno je šest uzoraka stakla dimenzija 200 x 400 mm. Uzorci su bili sljedeći: 2 x laminirano staklo 2 x 6 mm, 2 x laminirano staklo 2 x 10 mm, 1 x IZO staklo s dvostrukim laminiranim staklom od 6 mm i međuprostorom 12 mm, 1 x IZO staklo s dvo-

strukim laminiranim staklom od 10 mm i međuprostorom 12 mm. Svi uzorci su ESG - kaljena stakla prema normi BS EN 12150-1. Tolerancija pri izradi je u dopuštenim granicama prema normi EN 14179-8. Rubovi uzoraka su grubo brušeni (DIN1249-11). Staklene plohe kod laminiranog stakla povezane su PVB folijom debljine 0,76 mm. 90 % međuprostora kod IZO stakla je ispunjeno argonom. Distancer je aluminijski širine 12 mm s pripadajućim slojevima butila i silikona DC 3363. Mehaničke karakteristike stakla prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Mehaničke karakteristike stakla

E - Youngov modul elastičnosti	70 000 N/mm ²
G - modul posmika	28689 N/mm ²
μ - Poissonov koeficijent	0,22
α - koeficijent temperaturnog širenja	8,8 × 10 ⁻⁶
ρ - gustoća	2,5 g/cm ³
Tlačna čvrstoća	700 - 1000 N/mm ²
Vlačna čvrstoća	30 – 45 N/mm ²

3.2.2 Izrada drvenih uzoraka

Drvo se kao građevni materijal koristi u prirodnoj i mehanički obrađenoj verziji. Prednost mehaničke obrade drva je u tome što se vizualnim i strojnim razvrstavanjem odstranjuju greške i dobiva materijal s većom homogenošću. U novije vrijeme na tržištu drva i materijala na osnovi drva pojavio se proizvod pod nazivom križno uslojene ploče i grede (CLT). Drveni CLT elementi obrađeni su u laboratoriju Građevinskog fakulteta prema zadanim mjerama. CLT se sastoji od 3 sloja i svaki sloj je debljine 30 mm. Drvo je klase C24 čije su mehaničke karakteristike dane u tablici 2. Dodatne drvene gredice koje pridržavaju staklo su dimenzija 30 x 30 mm.

Tablica 2. Mehaničke karakteristike drva klase C24

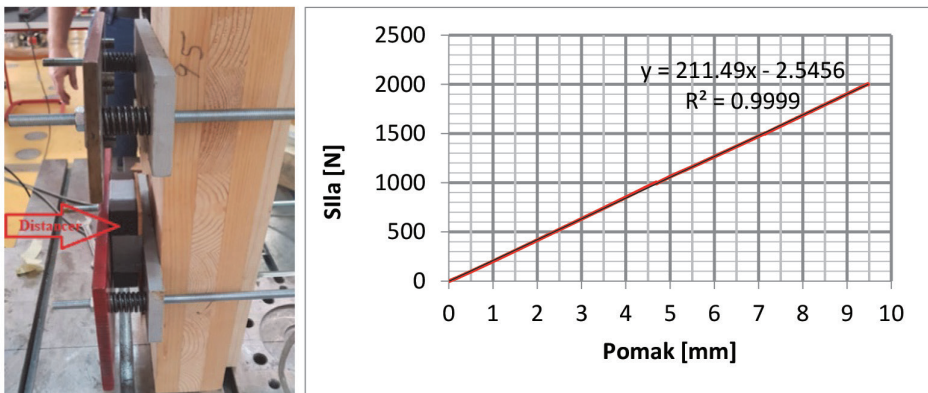
Mehaničke karakteristike drva C24									
Zapreminska težina [kg/m ³]	Srednji modul elastičnosti			Srednji modul posmika			Poissonov koeficijent		
	E _x [MPa]	E _y [MPa]	E _z [MPa]	G _{xy} [MPa]	G _{xz} [MPa]	G _{yz} [MPa]	ν _{xy}	ν _{xz}	ν _{yz}
420 kg/m ³	11000	600	580	600	690	580	0,3	0,25	0,6
Karakteristične čvrstoće drva klase C24, vrijednosti u [MPa]									
Savijanje f _{m,k}	Vlak paralelno f _{t,0,k}	Vlak okomito f _{t,90,k}	Tlak paralelno f _{c,0,k}	Tlak okomito f _{c,90,k}	Posmik f _{v,k}				
24	14	0,5	21	2,5	2,5				

3.3 Opis eksperimenta

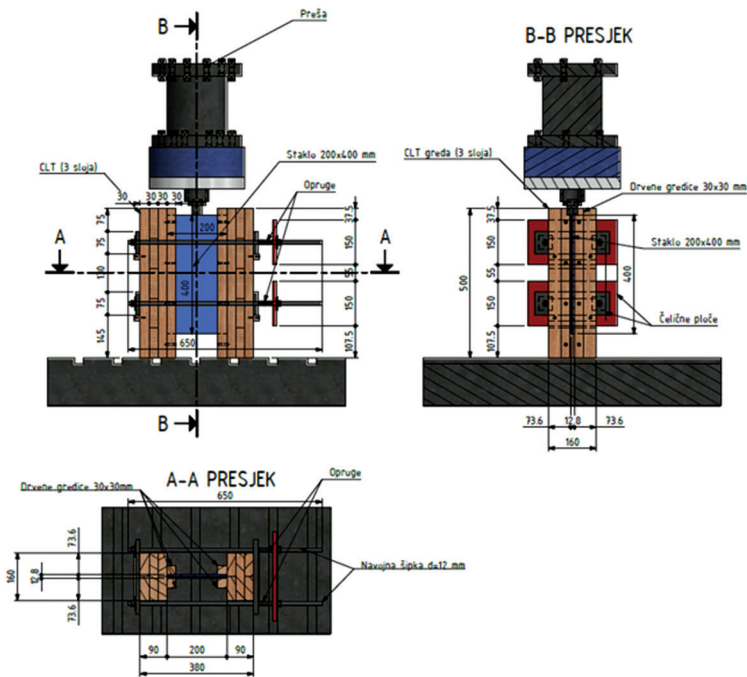
Eksperiment je proveden umetanjem laminiranog ili IZO staklenog uzorka između dva drvena elementa. Prije samog početka eksperimenta i unosa vertikalne sile, tj. sile koja djeluje u ravnini staklene plohe, potrebno je osigurati određeni bočni tlak između stakla i drva. Time direktno određujemo kontakt između drva i stakla. Sustav za unošenje bočne sile sastoji se od 6 čeličnih ploča, 4 navojne šipke s maticama, te 4 opruge. Sustav, dimenzije i pozicije elemenata prikazani su na slici 3.

3.3.1 Unos normalne (bočne) sile

Unos bočnog pritiska željenog iznosa (1 kN, 2 kN ili 3 kN) ostvaren je preko određene iznosa pomaka opruge. Opruge su postavljene između metalnih ploča. Pomak opruge ostvaren je preko pomaka metalnih ploča koje guraju opruge, odnosno kontroliranim zatezanjem i otpuštanjem matica na navojnoj šipci. Ovakav sustav omogućava konstantan bočni pritisak. Radi određivanja i kontroliranja bočne sile koja se unosi, napravljen je preliminarni test u kojem je cilj bio odrediti krutost opruga, tj. dobiti dijagram sila-pomak. Dijagram predstavlja odnos sile i pomaka za sve četiri opruge. Krutost opruge vidi se na slici 2. Određena je krutost jedne opruge, tako da je očitano 25 % iznosa sile iz dijagrama. Prednost ovog sustava je jednostavnost i točnost. Razmak između dvije metalne ploče, odnosno duljina opruge, određuje bočnu silu, a jednostavnost se očituje u mogućnosti izradi distancera željenih dimenzija koje možemo postaviti između dvije metalne ploče i zatim zategnuti vijke. Nakon postizanja željene bočne sile (F_n) i centriranje uzorka, aktivirana je preša pomoću koje je unesena sila na staklenu plohu. U svrhu sprječavanja direktnog kontakta između preše (čelik) i stakla, postavljena je tanka gumena podloška na rub stakla, tj. na mjestu unosa sile.



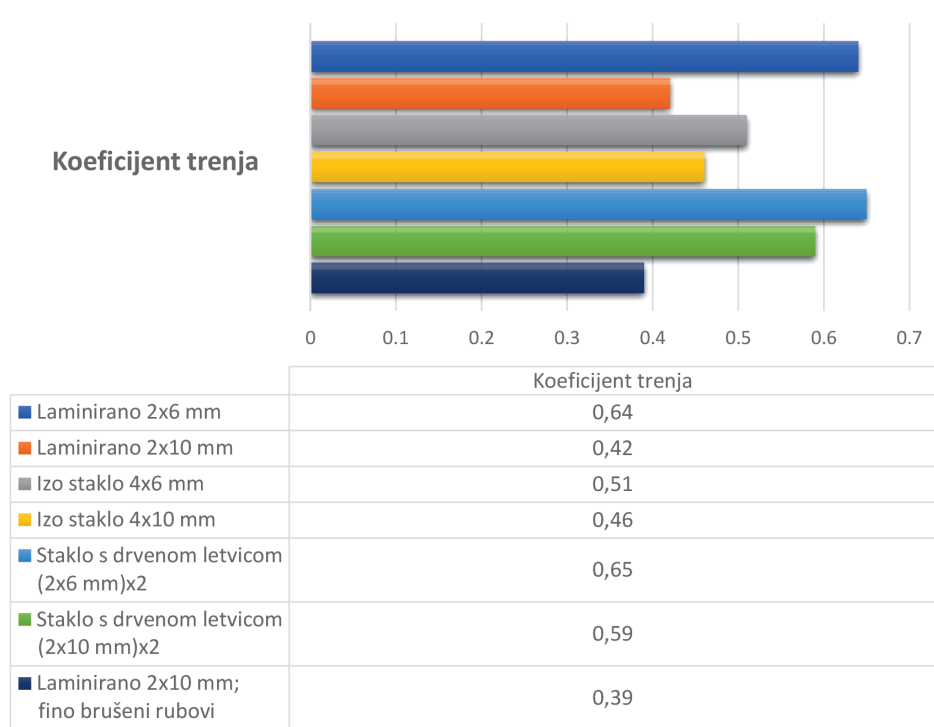
Slika 2. Krutost opruge i položaj distancera



Slika 3. Dimenzije i pozicije sustava za ispitivanje

3.4 Rezultati ispitivanja

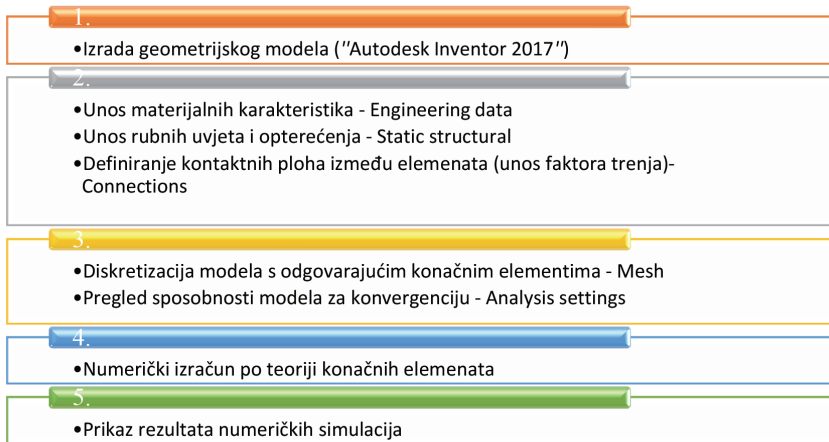
Ukupno je ispitivano sedam uzoraka. Uzorci se razlikuju u debljini i vrsti staklenih elemenata. Šest uzoraka ima neobrađene rubove, a jedan uzorak ima fino brušene rubove. Uzorak s fino brušenim rubovima je ispitivan naknadno da bi se vidio utjecaj same obrade stakla. Eksperimentalnim putem dobiven je koeficijent trenja μ , a dobije se kao omjer normalne (bočne) sile (F_n) i sile trenja (F_t). Kao što je već spomenuto, tijekom izmjerena je potrebna sila guranja staklene ploče tangencijalno na kontakt između drva i stakla, za određenu normalnu silu F_n . Rezultat se može grafički prikazati kao odnos između sile trenja F_t i uzdužnog pomaka pri određenoj normalnoj sili (F_n). Sila trenja (F_t) zapravo je polovica sile F potrebne za pomicanje stakla, jer se trenje javlja na dvije kontaktne plohe. U nastavku je dana usporedba rezultata pojedinih uzoraka (slika 4.) Sila trenja raste s povećanjem bočne sile i to po približno linearnom zakonu. Nakon utvrđene zakonitosti može se odrediti koeficijent trenja za svaki od uzoraka.



Slika 4. Koeficijent trenja – usporedba uzoraka

4 Numerički model

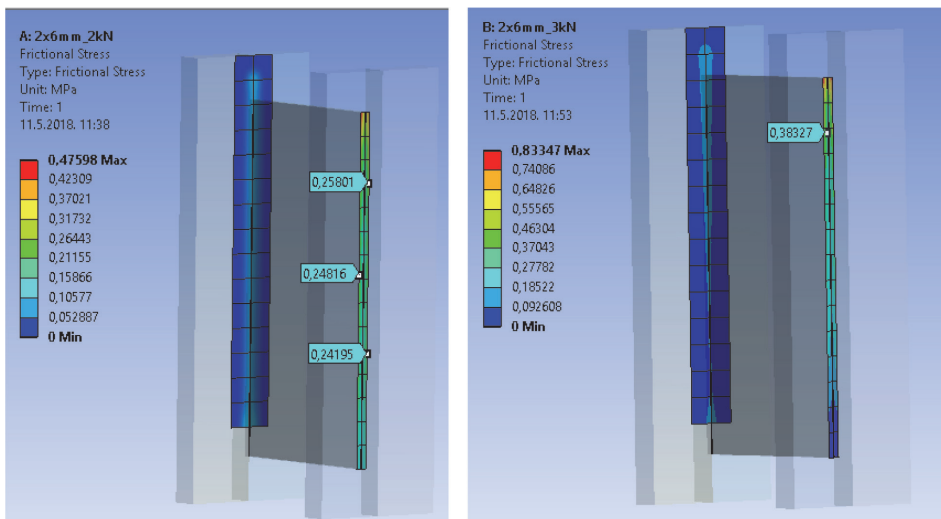
Provedena eksperimentalna istraživanja popraćena su numeričkim analizama. Cilj numeričkih analiza bio je proširenje znanja o ponašanju ispitanog sustava. Također, numeričke simulacije poslužile su kao potvrda i nadopuna eksperimentalnim rezultatima. Analiza je rađena programskom podrškom ANSYS, gdje se različite simulacije geometrijskih modela rješavaju uporabom metode konačnih elemenata (MKE) [11, 15, 17]. Cjelokupna geometrija modela izrađena je u programu "Autodesk Inventor 2017" te "uvučena" u računalni program ANSYS, gdje je formirana mreža konačnih elemenata i u kojem su se provodile daljnje simulacije. Shema postupka numeričke analize prikazana je na slici 5.



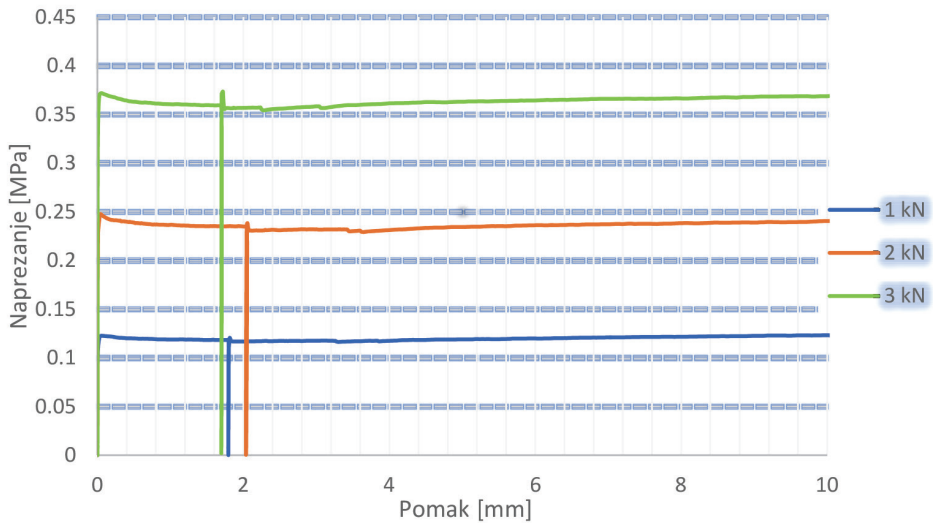
Slika 5. Shema postupaka numeričke analize

4.1 Rezultati numeričkih simulacija

S obzirom na to da je ispitivano više uzoraka, cilj numeričke analize je bio dobiti model i određenu zakonitost na osnovi koje bi se u budućnosti moglo predvidjeti ponašanje ovakvog sustava. Glavni parametar za kontrolu laboratorijskih ispitivanja i numeričkih simulacija je naprezanje, odnosno sila trenja koja se javlja na kontaktnim ploham, slika 6. i 7. Programaska podrška ANSYS pruža mogućnost prikaza rezultata u vidu naprezanja uslijed trenja koje se javlja na kontaktnim ploham. U svrhu usporedbe rezultata, izračunana su stvarna naprezanja koja se javljaju na dodirnim ploham.



Slika 6. Rezultati FEM analize – naprezanje na kontaktnim ploham



Slika 7. Rezultati laboratorijskog ispitivanja – naprezanje na kontaktim ploham

5 Zaključak i smjernice za daljnje istraživanje

Uvidom u postojeću literaturu i sadašnje stanje područja uočava se praznina u proučavanju kompozitnih sustava s nosivim staklom, posebice na opterećenja horizontalnim silama promjenljivog iznosa i smjera koja se događa prilikom potresnog opterećenja. Pri horizontalnom opterećenju, trenje između stakla i drva je čimbenik koji utječe na ponašanje i rad kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo. U određenoj mjeri trenje ovisi o načinu obrade samih elemenata (posebno stakla), te naravno, o opterećenju koje je uneseno u sustav. Rubovi staklenih elemenata mogu se obraditi na više načina. Pokazalo se da je razlika između koeficijenta trenja kod neobrađenih i fino brušenih rubova zanemariva. Postoji razlika u koeficijentu trenja kada je umjesto laminiranog stakla postavljeno izolacijsko staklo ili staklo s drvenim letvicama, no nije značajna.

Numeričkim simulacijama može se dobiti detaljniji uvid u ponašanje kompozitnih sustava i pojedinih dijelova sustava. Rezultati eksperimenta su potvrđeni. Postupci modeliranja su od velike pomoći pri projektiranju ovakvih sustava te se na njima može zasnivati budući istraživački rad.

U ovom radu prikazana su ispitivanja uzoraka stakla s neobrađenim rubovima i fino brušenim rubovima. U budućnosti se mogu ispitati stakleni elementi s poliranim rubovima, te tako ustanoviti ponašanje i interakcija dvaju materijala. Tijekom prijenosa opterećenja i rada ovakvog kompozitnog sustava, kontaktna ploha na drvenom elementu s vremenom se mijenja i “troši”. Analiza i istraživanje promjene koeficijenta trenja u vremenu i pri cikličnom opterećenju bila bi od velikog značenja.

Eksperimentalna ispitivanja su potvrđena numeričkim simulacijama, no postoji prostor za detaljniju analizu sustava. Prije svega, model se treba proširiti na cijeli kompozitni okvir i realne uvjete. U tom slučaju, u prijenosu opterećenja sudjeluje mnogo više komponenti koje zahtijevaju posebnu pažnju pri numeričkim simulacijama.

Literatura

- [1] Stepinac, M.: Spojevi kompozitnih sustava drvo - nosivo staklo u potresnom okruženju, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [2] EN 572 - Glass in buiding - Basic glass products, CEN 2004
- [3] EN 12543-2 Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Part 2: Laminated safety glass, CEN 2011
- [4] CEN, prEN 13474-2 Glass in building - Design of glass panes – Part 2: Design for uniformly distributed loads. 2000.
- [5] CEN, prEN 13474-3: Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing. 2000.
- [6] Antolinc, D.: Uporaba steklenih panelov za potresno varno gradnjo objekto. Doktorska disertacija, 2013.
- [7] Antolinc, D., Zarnic, R., Cepon, F., Rajcic, V., Stepinac, M.: Laminated Glass Panels in Combination with Timber Frame as a Shear Wall in Earthquake Resistant Building Design. Challenging Glass 3 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, TU Delft,, 2012.
- [8] CEN, EN 1998: Design of structures for earthquake resistance. 2004.
- [9] Rosliakova, V.: Architectural application and Ecological Impact Studies of Timber-Glass Composites Structures, engineered transparency. International Conference at glasstec, Düsseldorf, Germany, 2014., pp. 1-8
- [10] Winter W, H.W., Kreher K, Load bearing and stiffening timber-glass composites. WCTE 2010, 2010.
- [11] Sucharda, O., Mikolasek, D., Brozovsky, J.: Finite Element Analysis and Modeling of Details Timber Structure. International journal of mathematical models and methods in applied sciences, 9 (2015), pp. 380-388.
- [12] Rajcic, V., Zarnic, R.: Racking Performance of Wood-Framed Glass Panels. World Conference on TimberEngineering, Paper No. WCTE 2012.
- [13] Rajcic, V., Zarnic, R.: Seismic response of timber frames with laminated glass infill, Proceedings of CIB-W18 Meeting 45, CIB-W18/45-15-4, pp. 11-19, Växjö, Sweden, 2012.

- [14] Krstevska, L., Tashkov, L., Rajcic, V., Zarnic, R.: Shaking Table Test of Innovative Composite Panel Composed of Glued Laminated Wood and Bearing Glass. 15 WCEE (15th World Conference on Earthquake Engineering) Lisboa 2012, pp. 1-10.
- [15] Tankut, N., Tankut, A., Zor, M.: Finite Element Analysis of Wood Materials, *Drvna industrija*, 65 (2014) 2, pp. 159-171.
- [16] Antolinc, D., Rajčić, V., Žarnić, R., Analysis of hysteretic response of glass infilled wooden frames, *Journal of civil engineering and management*, 20 (2014) 4, pp. 600-608
- [17] Hidallana-Gamage, H.D., Thambiratnam, D.P., Perera, N.J.: Numerical modelling and analysis of the blast performance of laminated glass panels and the influence of material parameters. *Engineering Failure Analysis*, Volume 45, October 2014, pp. 65-84

Izravni postupak ispitivanja vlačne čvrstoće betona

Tvrtko Renić¹, prof.dr.sc. **Tomislav Kišiček²**

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, trenic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kisha@grad.hr

Sažetak

Vlačna čvrstoća i energija loma betona značajno utječu na ponašanje betonskih konstrukcija. Uobičajeno je koristiti neizravne metode ispitivanja, cijepanje i savijanje za određivanje vlačne čvrstoće betona. Neizravnim metodama nije moguće precizno procijeniti vlačno ponašanje betona. U radu je objašnjeno zašto su te metode neprikladne te je dan pregled preciznijih, izravnih metoda ispitivanja. Prikazane su prednosti i nedostaci svih metoda te opisani tehnički problemi pri ispitivanju. Nedostatak izravnog postupka ispitivanja je taj da još uvijek nije normiran.

Ključne riječi: vlačna čvrstoća, energija loma, metoda ispitivanja, cijepanje, mehanika loma

Direct tensile strength test of concrete

Abstract

The behaviour of concrete structures is greatly influenced by the tensile strength and fracture energy of concrete. Tensile strength is usually determined by indirect, splitting, or bending test methods. However, tensile behaviour of concrete can not accurately be estimated using indirect test methods. It is explained why these methods are inappropriate, and an overview of more accurate direct tensile test methods is presented. Advantages and disadvantages of all the methods are discussed, and technical problems that may arise during testing are presented. The biggest issue with the direct tensile test method is the fact that it is still not standardized.

Key words: tensile strength, fracture energy, test method, splitting, fracture mechanics

1 Uvod

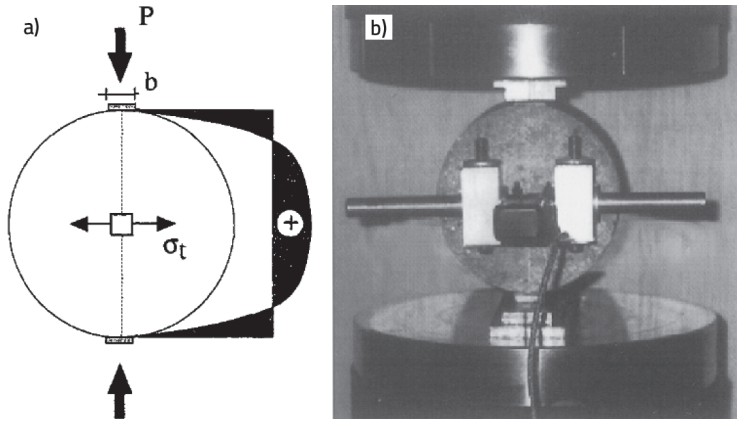
Vlačna čvrstoća svojstvo je betona o kojem ovisi raspucavanje, progib, trajnost, krutost i vodonepropusnost konstrukcije. Zbog toga je važno precizno procijeniti ponašanje betona u vlaku. Osim vlačnom čvrstoćom, ponašanje betona u vlaku određeno je i energijom loma. Iako je energija loma značajno svojstvo betona, u proračun se ne uzima eksplicitno. U situacijama gdje je njezin utjecaj bitan, kao na primjer kod posmika, izrazi za proračun su empirijski određeni [1]. Postupak ispitivanja ponašanja u vlaku stoga je vrlo važan. Uobičajeno se vlačno ponašanje betona određuje neizravnim ispitivanjem cijepanjem, opisanim u [2] ili savijanjem, opisanim u [1]. Neizravni postupci ispitivanja vlačne čvrstoće betona su normirani. Za ispitivanje cijepanjem koristi se norma HRN EN 12390-6:2010 [3], dok se za ispitivanje savijanjem koristi norma HRN EN 12390-5:2009 [4]. Energija loma i čvrstoća dobivene neizravno ne opisuju realno ponašanje betona, što je objašnjeno kasnije. Kako bi se energija loma precizno odredila, potrebno je zabilježiti ponašanje uzorka nakon vršnog opterećenja, odnosno razmatrajući vlačno omekšavanje. Postavke ispitivanja utječu na energiju loma. Ponašanje betona u vlaku preciznije je određeno izravnim postupkom ispitivanja, ali postoje brojni tehnički problemi pri provedbi izravnog postupka. Ekscentričnost unosa sile pri ispitivanju uzrokuje nejednoliku raspodjelu naprezanja u promatranom poprečnom presjeku uzorka. Također, beton je heterogen materijal. Na mezorazini je moguće razlikovati pojedina zrna agregata. Pri savršeno centričnom uzdužnom opterećenju naprezanja nisu jednolika po cijelom presjeku, bez obzira na odabrani način ispitivanja. Razlog nejednolikosti je heterogenost strukture materijala, koja se mora razmotriti pri procjeni vlačnog ponašanja betona. Stoga je ostvarivanje jednolikog stanja naprezanja teško provedivo [5]. Također, izravni postupak ispitivanja nije normiran. Na vlačna svojstva betona utječe niz parametara kao što su vodocementni omjer, veličina uzorka, vlažnost ispitivanog uzorka, starost betona, broj i veličina pora te veličina i oblik zrna agregata [5-10]. Vrsta betona (lakoagregatni beton, samozbijajući beton, vlaknima armiran beton, beton visoke čvrstoće...) [11-15] i način opterećenja (statički ili dinamički) [16, 17] također utječu na ponašanje betona u vlaku.

2 Neizravne metode ispitivanja

2.1 Ispitivanje cijepanjem

Vlačnu čvrstoću betona moguće je odrediti pritiskom cilindra duž njegove izvodnice. Raspodjela naprezanja po visini uzorka prikazana je na slici 1.a, dok je na slici 1.b prikazan uzorak prilikom ispitivanja. Zbog Poissonovog djelovanja dolazi do pojave vlačnih naprezanja u smjeru okomitom na djelovanje sile. Kako je vlačna čvrstoća

betona mala u odnosu na njegovu tlačnu čvrstoću, do sloma dolazi pojavom vlačne pukotine.



Slika 1. Ispitivanje cijepanjem: a) shema raspodjele naprezanja [18]; b) ispitani uzorak [19]

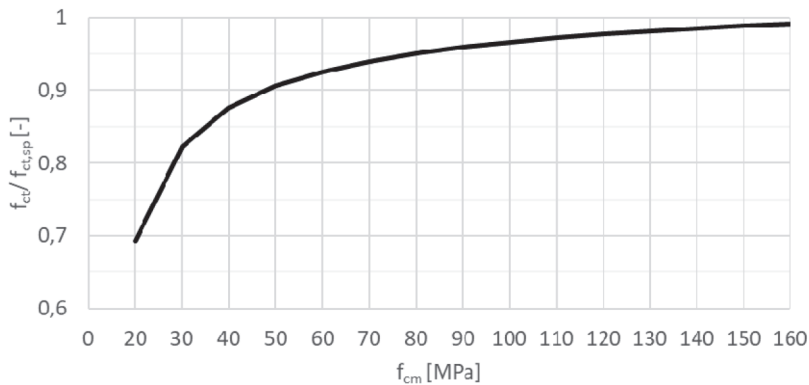
Prednosti postupka su što se može koristiti isti uzorak kao za ispitivanje tlačne čvrstoće, što su uzorci laki i kompaktni, što su uređaji za ispitivanje jednostavniji nego za izravni postupak i što je utjecaj vlastite težine na energiju loma zanemariv [20]. Nedostatak jednostavnijeg uređaja je taj da nije moguće odrediti ponašanje betona nakon vršnog opterećenja. Također, naprezanje koje se javlja u uzorku nije jednoliko po presjeku, već je gradijent naprezanja vrlo velik. Na mjestima unosa sile javlja se tlačno naprezanje okomito na smjer unesene sile, a na sredini poprečnog presjeka javlja se ujednačeno vlačno naprezanje. Nejednolikost naprezanja zbog unosa sile pridodaje se nejednolikosti uzrokovanoj heterogenom strukturom materijala, što je nepovoljno za procjenu ponašanja materijala. Razlika u modulu elastičnosti agregata i cementne paste utječe na stanje naprezanja u uzorku [5]. Rezultati ispitivanja cijepanjem ovise o obliku uzorka [19], veličini uzorka [21] i širini trake preko koje se unosi opterećenje [18]. Vlačna čvrstoća određena cijepanjem nije realna vrijednost. Prema [22], odnos vlačne čvrstoće dobiven izravno i cijepanjem ovisi o tlačnoj čvrstoći betona, a određen je izrazom (1):

$$\frac{f_{ct}}{f_{ct,sp}} = \frac{2,635 \cdot \ln(f_{cm}) - 6,322}{2,329 \cdot \ln(f_{cm}) - 4,71} \quad (1)$$

gdje je:

f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betonskog valjka pri starosti 28 dana

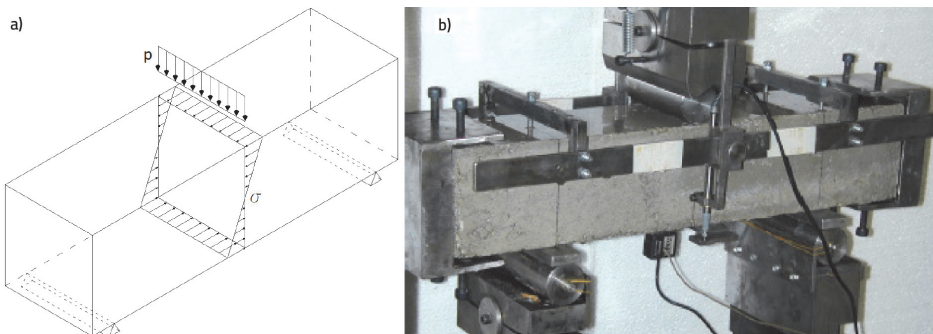
Na slici 2. grafički je prikazan odnos određen izrazom (1). Vidljivo je da za niže razrede betona vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem nije prihvatljiva.



Slika 2. Odnos tlačne čvrstoće betona i omjera vlačnih čvrstoća dobivenih izravno i cijepanjem

2.2 Ispitivanje savijanjem

Vlačnu čvrstoću betona moguće je odrediti pritiskom prizme jednom (three point bending test) ili dvjema silama (four point bending test). Na slici 3.a prikazan je poprečni presjek u sredini raspona uzorka. Vidljiva je raspodjela naprezanja u presjeku po visini elementa, pri čemu je tlačno naprezanje negativno, a vlačno pozitivno. Na slici 3.b prikazan je uzorak opterećen jednom silom u sredini raspona.



Slika 3. Ispitivanje savijanjem: a) shema raspodjele naprezanja u poprečnom presjeku; b) ispitani uzorak [23]

Vidljivo je da se javlja problem nejednolikosti naprezanja slično kao i pri ispitivanju cijepanjem. Vlastita težina uzorka utječe na stanje naprezanja, što uzrokuje nekontrolirani lom na kraju ispitivanja. Također, u blizini oslonaca se javlja koncentracija naprezanja pa može doći do oštećenja uslijed gnječanja betona. Na pomičnom

osloncu se zbog nesavršenosti javlja trenje koje sprječava slobodni pomak ruba uzorka. Zanemarenje disipacije energije izvan područja raspucavanja rezultira pogrešnim vrijednostima energije loma koji je dobiven ispitivanjem [5]. Prema [22] odnos vlačne čvrstoće dobiven izravno i savijanjem određen je izrazom (2):

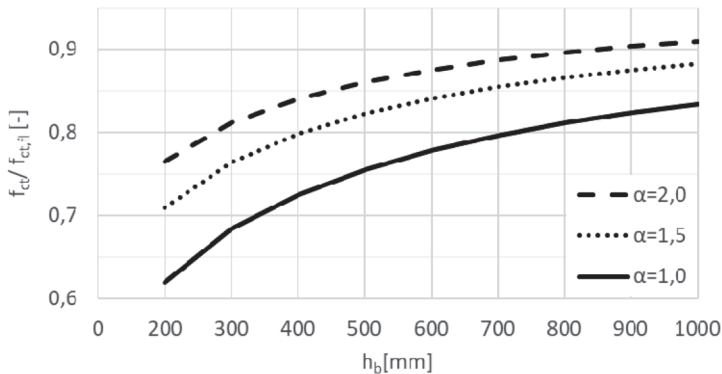
$$\frac{f_{ct}}{f_{ct,fl}} = \frac{\alpha_{fl} \cdot \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0,7}}{1 + \alpha_{fl} \cdot \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0,7}} \quad (2)$$

gdje je:

α_{fl} - koeficijent koji ovisi o krhkosti betona

h_b - visina poprečnog presjeka uzorka u milimetrima

Prema [22], preporučena vrijednost $\alpha_{fl} = 1,5$ ali on varira u skladu s razredom betona. Veća vrijednost α_{fl} odgovara nižim razredima betona [22]. Na slici 4. prikazan je odnos određen izrazom (2) za vrijednosti $\alpha_{fl} = 1$, $\alpha_{fl} = 1,5$ i $\alpha_{fl} = 2$. Vidljivo je da za manju visinu presjeka vlačna čvrstoća dobivena savijanjem nije prihvatljiva.



Slika 4. Odnos visine uzorka i omjera vlačnih čvrstoća dobivenih izravno i savijanjem

3 Izravna metoda ispitivanja

Postavke ispitivanja različitih autora značajno variraju oblikom uzorka, oslabljenjima, rubnim uvjetima, načinom unosa sile, brzinom unosa sile itd. Razlike u postavkama ispitivanja uzrokuju različite rezultate. Iako je poznat odnos vlačne čvrstoće ispitane izravno i neizravno za standardne betone, za posebne vrste betona i ostale materijale na bazi cementa ti odnosi ne moraju biti prikladni. Jedino je izravnom

metodom moguće uzorak opteretiti jednoliko. Većina sadašnjih modela loma određena je na temelju podataka izravnih ispitivanja [24] pa je izravni postupak potreban standardizirati.

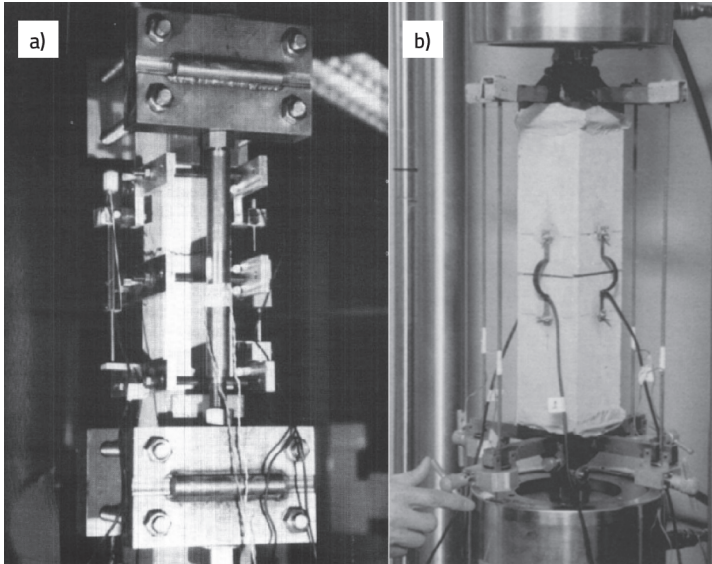
3.1 Oblik uzorka

Prvi pokušaji određivanja vlačne čvrstoće betona su bili provedeni na epruvetama postupno promjenjivog presjeka (oblik kosti ili „dog-bone“). Zbog promjenjivog oblika dolazi do pojave koncentracije naprezanja prema sredini visine uzorka. Do sloma može doći u presjeku koji nije najmanji zbog nehomogenosti materijala [5]. Uzorci oblika kosti korišteni su u ispitivanjima opisanim u [16, 17, 25-27]. U ispitivanjima prema [12, 13, 28-31] korišteni su uzorci prizmatičnog oblika, a u ispitivanjima prema [14, 32-34] uzorci cilindričnog oblika. Kompleksniji oblici uzoraka korišteni su u radu [35]. Uzorci su lokalno oslabljeni u ispitivanjima prema [12, 13, 27, 29]. Preporučeni oblik prema [36] je prizmatičan zbog jednostavne izvedbe i lakšeg mjerenja deformacije i energije loma. Nedostatak cilindričnog oblika je taj da vlačna čvrstoća ovisi o smjeru lijevanja betona (vertikalni ili horizontalni), a nedostatak uzorka oblika kosti je komplicirana izvedba i određivanje energije loma. Kvadratni poprečni presjek prikladniji je od pravokutnog jer se koristi manje materijala, a utjecaj ekscentričnosti je manji [36]. Duljina uzorka također utječe na rezultate ispitivanja. Što je element dulji, utjecaj vlastite težine uzorka je veći. Međutim, što je element kraći, nejednolikost naprezanja je izraženija [37].

4 Utjecaj ekscentričnosti i rubni uvjeti

Usljed ekscentričnosti se javlja savijanje uzorka. Bitno je izbjeći savijanje uzorka, jer ono smanjuje vršno opterećenje [37]. Ekscentričnost se javlja zbog postavki ispitivanja, ali i zbog heterogenosti materijala (sekundarna ekscentričnost). Kako bi se spriječila ekscentričnost opterećenja, moguće je uzorak upeti kao na slici 5.a ili ga zglobno povezati kao na slici 5.b (zglob je vidljiv u blizini uređaja za ispitivanje). U određenim ispitivanjima se upetost pokušala ostvariti lijepljenjem čeličnih ploča na uzorak pomoću epoksidnog ljepila. Ploče se zatim izravno razvlače. Međutim, kod tako oblikovanih uzoraka dolazi do male rotacije na kontaktu ljepila i uzorka pa potpuna upetost nije ostvarena [37]. Upetost je moguće osigurati debelim čeličnim pločama preko kojih se sila u uzorak unosi trenjem. Postupak je prikazan na slici 5.a), odnosno u [27]. Energija loma je niža ako su rubni uvjeti zglobni [5], pa se postavlja pitanje koji je postupak prikladniji. Prema [5], zglobnim oslanjanjem ostvaruje se prikladnija vrijednost energije loma. Suprotno tome, u [38] se tvrdi da je realnija energija loma dobivena s upetim rubnim uvjetima. Osim ekscentričnosti, potrebno je osigurati jednolik unos sile u beton. Na slici 5.a jednolik unos ostvaruje se trenjem između bočnih ploča i uzorka. Na slici 5.b jednolik unos ostvaruje se preko aluminijskih

ske ploče koja je zalijepljena na donju i gornju stranu uzorka. Pri tome je bitno da je ploča dovoljne debljine kako bi se ostvario jednolik unos opterećenja. Prema [12, 14, 32] unos jednolike sile ostvaruje se sidrenjem armaturne šipke u uzorak. Prema [25] se jednolik unos ostvaruje obuhvaćanjem šireg dijela uzorka, a u [35] preko čeličnog prstena. Broj različitih načina unosa opterećenja je velik, a rezultati variraju pa je usporedba rezultata različitih istraživača upitna.



Slika 5. Izravno ispitivanje: a) upeto oslanjanje [27]; b) zglobno oslanjanje [29]

Sekundarna ekscentričnost se javlja kad se u nekom presjeku javi oštećenje. Dio presjeka koji je oštećen (omekšan) produljuje se više nego neoštećeni dio pa dolazi do nejednolikog stanja deformacija unutar presjeka. Moguće je nakon oštećenja unijeti u uzorak suprotnu ekscentričnost. Tada će se u nekom drugom presjeku zbog nove ekscentričnosti javiti oštećenje na suprotnoj strani presjeka od prvog oštećenja. U slučaju da se ponovo pokuša korigirati opterećenje, prvi presjek će ponovo uzrokovati ekscentričnost. Problem, dakle, nije moguće riješiti unosom namjerne ekscentričnosti. Da bi se problem riješio potrebno je postaviti oslabljenja u određeni presjek kao što je prikazano na slici 5.b kako bi u tom presjeku došlo do otkazivanja. Utjecaj sekundarne ekscentričnosti detaljnije je objašnjen u [36]. Iako u oslabljenom presjeku naizgled dolazi do koncentracije naprezanja, pri vršnom opterećenju je raspodjela naprezanja u oslabljenom presjeku gotovo jednolika [36]. Oslabljenja je potrebno postaviti na sve četiri strane poprečnog presjeka, uobičajeno u polovici visine uzorka. Dublji zarez osiguravaju da će do otkazivanja doći u oslabljenom presjeku, ali je tako utrošena veća količina materijala [36]. Stoga je potrebno odrediti najmanju zadovoljavajuću dubinu zarez. U [36] ispitivani su uzorci dimenzija $100 \times 100 \times 400$ mm, a preporučeno je koristiti zarez dubine 10 mm.

3.3 Modeliranje

Zbog ranije navedenih problema kod svih metoda vlačnog ispitivanja betona, numeričko modeliranje omekšavanja provedeno paralelno s ispitivanjem čini se prikladnim. Modeliranje je moguće provesti na tri razine: makrorazini, srednjoj (mezo) razini i mikrorazini. Prednost modeliranja na makrorazini je što se koristi najmanje računalne memorije, ali je potrebno pretpostaviti način sloma [5] što može dovesti do pogrešne procjene oblika sloma i ponašanja kao što se pokazalo u [39]. Modeliranjem na mikrorazini može se ostvariti najpreciznija procjena, ali zbog vrlo velikog utroška računalne memorije postupak je zasad neprimjenjiv. Postupak na mezorazini je najprikladniji za modeliranje ponašanja. Modelima na mezorazini formiraju se mehanizmi loma, za razliku od modela na makrorazini gdje mehanizmi loma moraju biti pretpostavljeni na početku analize [5]. Modeliranje može biti koristan alat pri procjeni stanja naprezanja u elementu i prikladnosti metode ispitivanja.

4 Zaključak

Vlačna čvrstoća i energija loma bitna su svojstva betona. Velik broj parametara utječe na vlačno ponašanje betona. Uobičajeno je vlačnu čvrstoću betona odrediti neizravnim postupcima ispitivanja, cijepanjem ili savijanjem. Tako dobivena vlačna čvrstoća ne odgovara čvrstoći dobivenoj izravnim ispitivanjem. Energiju loma neizravnim postupcima nije moguće odrediti. Iako je ponašanje betona realnije određeno izravnim postupkom ispitivanja, on nije standardiziran. Pri provedbi izravnog postupka javlja se niz tehničkih problema kao što su ekscentrični unos opterećenja i jednolik unos opterećenja. Velik broj razlika u dimenzijama, materijalu i načinu unosa sile ispitanih uzoraka nije prikladan za usporedbu rezultata različitih ispitivanja. Stoga je potrebno odrediti standardni postupak izravnog ispitivanja vlačne čvrstoće betona.

Literatura

- [1] Hillerborg, A.: The theoretical basis of a method to determine the fracture energy GF of concrete, *Materials and Structures*, 18 (1985) 4, pp. 291-296.
- [2] Carneiro, F., Barcellos, A.: Resistance a la traction des betons, *Bulletin RILEM*, 13 (1953), pp. 97-108.
- [3] HRN EN 12390-6:2010: Ispitivanje očvrsloga betona - 6. dio: Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitnih uzoraka.
- [4] HRN EN 12390-5:2009: Ispitivanje očvrsloga betona - 5. dio: Čvrstoća ispitnih uzoraka na savijanje.

- [5] Van Mier, J.G.M., Van Vliet, M.R.A.: Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art, *Engineering Fracture Mechanics*, 69 (2002) 2, pp. 235-247.
- [6] Bisschop, J.: *Drying shrinkage microcracking in cement-based materials*, TU Delft, 2002.
- [7] Li, D., Li, Z., Lv, C., Zhang, G., Yin, Y.: A predictive model of the effective tensile and compressive strengths of concrete considering porosity and pore size, *Construction and Building Materials*, 170 (2018), pp. 520-526.
- [8] Nguyen, D.H., Dao, V.T.N.: A novel approach to estimate the evolution of fracture energy and tensile softening curve of concrete from very early age, *Engineering Fracture Mechanics*, 196 (2018), pp. 43-55.
- [9] Van Vliet, M.R.A.: *Size effect in tensile fracture of concrete and rock*, TU Delft, 2000.
- [10] Bonzel, V.J., Kaldeček, V.: Einfluß der Nachbehandlung und des Feuchtigkeitszustands auf die Zugfestigkeit des Betons, *Betontechnische Berichte*, 20 (1970) 7, pp. 99-132.
- [11] Cornellissen, H.A.W., Hordijk, D.A., Reinhardt, H.W.: Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight concrete, *Heron*, 31 (1986) 2, pp. 45-56.
- [12] Alhussainy, F., Hasan, H.A., Rogic, S., Neaz Sheikh, M., Hadi, M.N.S.: Direct tensile testing of Self-Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 112 (2016), pp. 903-906.
- [13] Choi, S.J., Yang, K.H., Sim, J.I., Choi, B.J.: Direct tensile strength of lightweight concrete with different specimen depths and aggregate sizes, *Construction and Building Materials*, 63 (2014), pp. 132-141.
- [14] Abbass, W., Khan, M.I., Mourad, S.: Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, *Construction and Building Materials*, 168 (2018), pp. 556-569.
- [15] Graybeal, B.A.: Practical Means for Determination of the Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete, *Journal of ASTM International*, 3 (2006) 8, pp. 1-9.
- [16] Yan, D., Lin, G.: Dynamic properties of concrete in direct tension, *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 7, pp. 1371-1378.
- [17] Xiao, S., Li, H., Monteiro, P.J.M.: Influence of strain rates and load histories on the tensile damage behaviour of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 62 (2010) 12, pp. 887-894.
- [18] Rocco, C., Guinea, G. V., Planas, J., Elices, M.: Size effect and boundary conditions in the brazilian test: theoretical analysis, *Materials and Structures*, 32 (1999) 6, pp. 437-444.

- [19] Rocco, C., Guinea, G.V., Planas, J., Elices, M.: Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: Experimental verification, *Materials and Structures*, 32 (1999) April, pp. 210-217.
- [20] Ince, R.: Determination of concrete fracture parameters based on two-parameter and size effect models using split-tension cubes, *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (2010) 12, pp. 2233-2250.
- [21] Bazant, Z.P., Mazars, J., Kazemi, M.T., Hasegawa, T.: Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis, *Materials Journal*, 88 (1991) 3, pp. 325-332.
- [22] fib (Fédération International du Béton): Constitutive modelling of high strength/high performance concrete - Bulletin, 42 (2008.), pp. 126.
- [23] Gómez, F.J., Martín-Rengel, M.A., Ruiz-Hervias, J., Fathy, A.M., Berto, F.: New iterative method to obtain the softening curve in concrete, *Procedia Structural Integrity*, 2 (2016), pp. 2841-2848.
- [24] Burns, C.: Serviceability Analysis of Reinforced Concrete Based on the Tension Chord Model, *IBK Bericht*, (2012) 342, pp. 147.
- [25] Nguyen, D.H., Dao, V.T.N., Lura, P.: Tensile properties of concrete at very early ages, *Construction and Building Materials*, 134 (2017), pp. 563-573.
- [26] Boulay, C., Rossi, P., Tailhan, J.L.: Uniaxial tensile test on a new cement composite having hardening behaviour, 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Varenna, pp. 61-68, 2004
- [27] Phillips, D.V., Binsheng, Z.: Direct tension tests on notched and un-notched plain concrete specimens, *Magazine of Concrete Research*, 45 (1993) 162, pp. 25-35.
- [28] Chen, X., Wu, S., Zhou, J.: Strength Values of Cementitious Materials in Bending and Tension Test Methods, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (2014) 3, pp. 484-490.
- [29] Akita, H., Koide, H., Tomon, M., Sohn, D.: A practical method for uniaxial tension test of concrete, *Materials and Structures*, 36 (2003) 6, pp. 365-371.
- [30] Swaddiwudhipong, S., Lu, H.R., Wee, T.H.: Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 12, pp. 2077-2084.
- [31] Li, Q., Duan, Y., Wang, G.: Behaviour of large concrete specimens in uniaxial tension, *Magazine of Concrete Research*, 54 (2002) 5, pp. 385-391.
- [32] Lin, W.T., Wu, Y.C., Cheng, A., Chao, S.J., Hsu, H.M.: Engineering Properties and Correlation Analysis of Fiber Cementitious Materials, *Materials*, 7 (2014) 11, pp. 7423-7435.

- [33] Kim, J.J., Reda Taha, M., Kim, J.J., Reda Taha, M.: Experimental and Numerical Evaluation of Direct Tension Test for Cylindrical Concrete Specimens, *Advances in Civil Engineering*, (2014), pp. 1-8.
- [34] Lin, W.T., Cheng, A., Huang, R., Cheng, T.C.: A method for testing the strength of concrete using uniaxial direct tension, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 36 (2013) 3, pp. 295-303.
- [35] Sarfarazi, V., Haeri, H., Ebneabbasi, P., Bagher Shemirani, A., Hedayat, A.: Determination of tensile strength of concrete using a novel apparatus, *Construction and Building Materials*, 166 (2018), pp. 817-832.
- [36] Akita, H., Koide, H., Mihashi, H.: Specimen geometry in uniaxial tension test of concrete, *International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures 6*, Catania, 2007.
- [37] Akita, H., Koide, H., Ozaka, Y.: Discussion on Secondary Flexure in Uniaxial Tension Test of Concrete, *Brittle Matrix Composites 8*, Warsaw, pp. 187-194., 2006.
- [38] Mechtcherine, V., Müller, H.S.: Effect of the test set-up on fracture mechanical parameters of concrete, *International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures 3*, Gifu, pp. 377-386., 1998.
- [39] Elfgren, L., Eligehausen, R., Rots, J.G.: Anchor bolts in concrete structures: summary of round robin tests and analysis arranged by RILEM TC 90-FMA 'Fracture Mechanics of Concrete-Applications', *Materials and Structures*, 34 (2001), pp. 451-457.

Dinamički parametri u ocjeni stanja mostova

mr.sc. **Damir Tkalčić**¹, izv.prof.dr.sc. **Ana Mandić Ivanović**²

¹ Tempus projekt d.o.o., damir.tkalcic@tempus-projekt.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mandicka@grad.hr

Sažetak

Cestovna mreža svake razvijene zemlje jedan je od najiskorištenijih i najživljih sustava. Mostovi su iznimno važan dio cestovne infrastrukture, a zbog svoje originalne strukture i opsežne uporabe u raznolikome okolišu izloženi su ubrzanome propadanju. Mnoge vlade i lokalne vlasti kao i istraživačke institucije širom svijeta razvijaju sustave za planirano i razumno održavanje mostova. Prikladne metode ispitivanja i nadzora nad mostovima u sustavnome procesu održavanja još uvijek se razvijaju u cilju ocjenjivanja stanja konstrukcije kao i za planiranje životnog ciklusa i planiranje prioriteta u održavanju. U ovome se radu razmatraju dinamički parametri koji mogu poslužiti u ocjeni stanja mostova.

Ključne riječi: cestovna mreža, most, sustav održavanja, nadzor, stanje konstrukcije, dinamički parametri

Dynamic parameters in bridge condition assessment

Abstract

The road network of each developed country is one of the most used and vibrant systems. Bridges are an extremely important part of road infrastructure, and due to their peculiar structure and extensive use in diverse environment, they are exposed to accelerated deterioration. Many governments and local authorities as well as research institutions around the world are developing systems for reasonable and sustainable bridge maintenance and management. Appropriate methods of inspection and monitoring of bridges in the systematic maintenance process are still being developed in order to assess the condition of the structure, as well as for the planning of the life cycle and maintenance priorities. This paper deals with dynamic parameters that can serve in a bridge condition assessment.

Key words: road network, bridge, maintenance system, monitoring, structural condition, dynamic parameters

1 Uvod

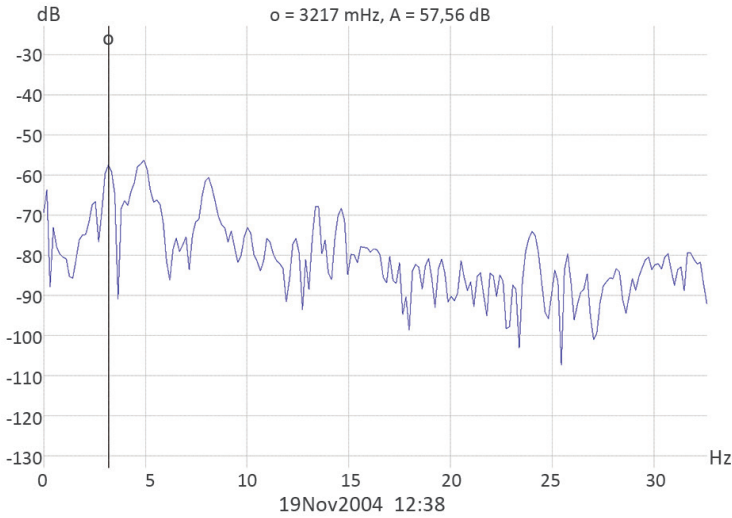
Dinamička ispitivanja mosta u sustavu ocjene mosta trebala bi se se provoditi svakih pet godina, otprilike kao i redoviti pregledi mostova. Dinamička ispitivanja najčešće se provode bez prekida prometa i u kratkome vremenu. Rezultati dinamičkih ispitivanja u sustavu pregleda mostova trebaju se evidentirati i pohraniti kao dio rezultata pregleda. S tim rezultatima uspoređuju se rezultati sljedećih pregleda i ispitivanja te se na taj način može, promatrajući promjene dinamičkih parametara, donijeti zaključak o propadanju konstrukcija. Dinamički parametri najpogodniji za dugotrajno praćenje jesu:

- vlastite frekvencije mosta
- prigušenje.

Njihove promjene tijekom vremena mogu, prema [1], ukazati na sljedeće pojave koje se mogu pojaviti pojedinačno ili u kombinaciji:

- Moment tromosti raspucanog betona smanjuje se te se time umanjuje i vlastita frekvencija betonskog mosta.
- Gubitak sile prednapinjanja u prednapetim nosačima povećava vjerojatnost pojave vlačnih pukotina, pukotine umanjuju krutost nosača, a time se ponovno umanjuje i vlastita frekvencija cijeloga mosta.
- Promijenjeni uvjeti oslanjanja na mostovima mogu dovesti do promjene vlastite frekvencije mosta.
- Pukotine u betonu povećavaju prigušenje konstrukcije.
- Promjene uvjeta na ležajima (korozija, zatrpavanje, uništenje ležaja i slično) mijenjaju prigušenje.

Dinamičko ispitivanje provodi se u sustavu pregleda mosta za slučajno opterećenje koje nailazi na most. Uz pomoć akcelerometara postavljenih na nekoliko mjesta uzduž mosta u odabranome, najčešće vertikalnome smjeru zapisuju se oscilacije betonskog mosta. Podaci se bilježe kontinuirano tijekom duljeg razdoblja. Na slici 1. prikazana je funkcija odziva konstrukcije u frekvencijskoj domeni [2]. Daljnjom analizom podataka odnosno izradom spektara zapisa moguće je izdvojiti karakteristične frekvencije koje odgovaraju pojedinim oblicima titranja konstrukcija. Razvoj dinamičkih ispitivanja i procesiranja signala omogućuju znatan uvid u ponašanje konstrukcije bez narušavanja integriteta konstrukcije.



Slika 1. Funkcija odziva konstrukcije u frekvencijskoj domeni

2 Stanje područja

Sustavi nadzora nad mostovima zahtijevaju pouzdane podatke kao osnovu za njihovo djelotvorno djelovanje i njihovu korisnost u procesu procjene stanja građevine. Nedostatak podataka ili prevelik opseg podataka dovodi do toga da je svaki, čak i najsofisticiraniji sustav neučinkovit. U sustavima nadzora mostova podaci se prikupljaju trajno ugrađenim mjernim sustavima ili sustavno izvedenim ispitivanjima. Obje tehnike trebaju biti pozorno osmišljene uzimajući u obzir sljedeće parametre, prema [1]:

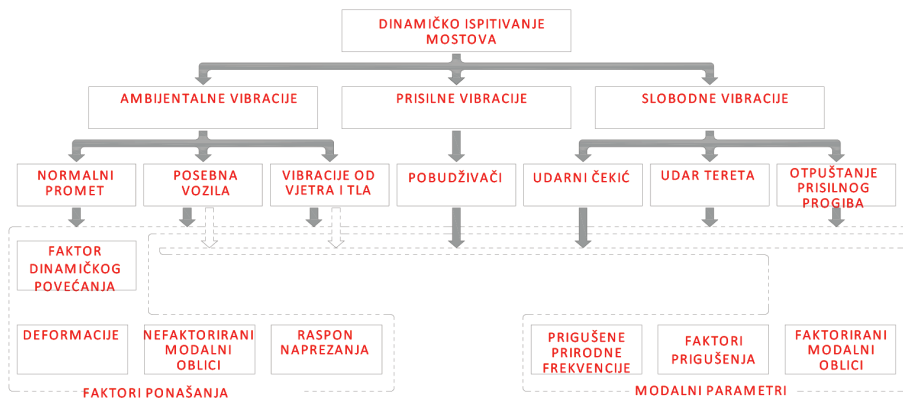
- cilj nadzora te veličinu i važnost nadzirane građevine,
- proračunske troškove (troškove materijala, uređaja, putovanja na lokaciju, usluga instaliranog sustava i druge),
- opremu dostupnu za testiranje: senzore, sustave za prikupljanje podataka, uređaje za pobuđenje (ako je to potrebno), softver koji se koristi za prikupljanje i obradu podataka,
- logistiku (prijevoz, izvore energije, zaštitu od vandalizma i štete, osiguranje i drugo),
- očekivani period rada sustava nadzora, mjerne veličine i potrebnu preciznost,
- mjesto mjernih točaka i
- količinu podataka prikupljenih u razdoblju nadzora, pravila i format pohranjenih i dijeljenih podataka.

Popis ne obuhvaća sva pitanja vezana uz dizajn sustava praćenja, ali može dati pregled nad veličinom pothvata koji bi bio potreban kako bi se osigurali pouzdani podaci.

Mostovi i ostale građevine kao što su dimnjaci i brane kontinuirano su izloženi različitim dinamičkim opterećenjima kao što su pokretna opterećenja te različita ambijentalna opterećenja koja ovise o vjetru i vibracijama tla. Suvremeni trendovi koji inženjere prisiljavaju na to da projektiraju i izgrade sve hrabrije i vitkije građevine doveli su do pojave novih fenomena u ponašanju mosta. Ti čimbenici potiču sve veće zanimanje za provedbu dinamičkih ispitivanja te za razvoj novih alata za obradu, analizu i procjenu podataka u cilju ispravnog ocjenjivanja postojećih mostova i projektiranja novih.

Mnoge metode ispitivanja i algoritmi u projektiranju mostova preuzete su iz strojarstva gdje su već istraživani dinamički fenomeni i eksperimentalna modalna analiza [3, 4]. Međutim, izravna uporaba svih tih metoda za konstrukcije mostova dovode do mnogih problema povezanih sa složenijom prirodom materijala koji se koriste u izgradnji mostova poput betona, kamena, cigle, zemlje ili kompozitnih materijala. Na istražene modalne parametre konstrukcije mostova također utječu okolni uvjeti kao što su temperatura i vlažnost.

Izbor odgovarajuće metode ispitivanja s obzirom na njezinu primjenjivost na sustav nadzora mostova treba se temeljiti na analizi raspoloživih tehnika. Predložena taksonomija najpopularnijih dinamičkih ispitivanja mostova prikazana je na slici 2., [1].



Slika 2. Taksonomija dinamičkih ispitivanja mostova

3 Dosadašnje istraživanje

Da bi se dobio stvarni uvid u ponašanje nekoga betonskog mosta tijekom vremena, treba ga promatrati dugi niz godina. Za potrebe ispitivanja odabrana je skupina šest nadvožnjaka jednakih konstrukcijskih elemenata i jednakih dimenzija na autocesti Bregana – Zagreb – Lipovac, no različite starosti, i to od novog nadvožnjaka do nadvožnjaka starog 35 godina. Na njima su se mjerili dinamički parametri pod dinamičkim opterećenjem prelaskom natovarenog kamiona preko prepreke, slika 3. [2].



Slika 3. Prisilno izazivanje dinamičke pobude betonskog mosta

Promjene eksperimentalno određenih dinamičkih parametara karakterističnog nadvožnjaka povezane sa starošću konstrukcije prikazane su na sljedeća tri dijagrama:

- period oscilacija
- vlastita frekvencija oscilacija
- prigušenje konstrukcije.

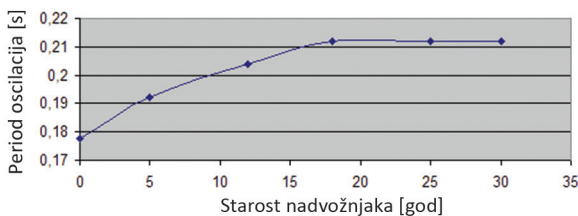
Dinamičko ispitivanje provedeno je tijekom prekida prometa jer je namjera bila dobiti ponašanje betonskog mosta pod jednakim dinamičkim opterećenjem. Dinamičko ispitivanje mostova trebalo bi se provoditi u procesu ocjene stanja mostova. Za početno ispitivanje postojećih mostova različite starosti predlaže se provesti ispitivanje u danome vremenu koje je uzeto kao nulto stanje te pratiti ponašanje mosta pod djelovanjem prometnog opterećenja pod kojim se inače nalazi.

Kao rezultat takvog ispitivanja dobiju se dinamičke veličine prikazane u gornja tri dijagrama koje mogu dovesti do zaključka o promjenama stanja betonskog mosta od prethodnog ispitivanja. Nedostaci postupka su sljedeći:

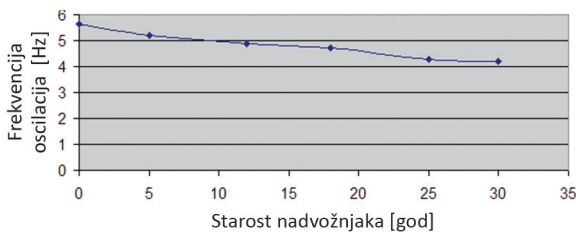
- Na rezultate utječe temperatura konstrukcije i asfalta kolnika. Zato bi trebalo povećati broj mjerenja ili postupak provoditi pod jednakom temperaturom.
- Promjena frekvencije proporcionalna je drugome korijenu promjene krutosti. Zato mjerenja moraju biti vrlo precizna i izvedena pouzdanom opremom.
- Postupkom se može utvrditi to da je došlo do promjene krutosti, iako promjena tromosti ukazuje na neka oštećenja u konstrukciji. Zato u postupku ocjene stanja mosta treba provesti dodatna ispitivanja.

Promjene dinamičkih parametara mjerenih u ovome istraživanju ukazuju na sljedeće:

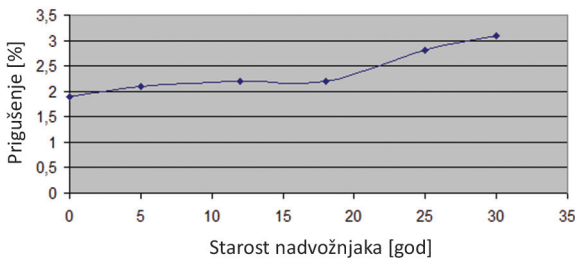
- Povećanje perioda osciliranja sa starošću znači to da konstrukcija sa starošću postaje mekša odnosno da sadrži nekakva, vidljiva ili skrivena, oštećenja i pukotine (slika 4.).
- Povećanje perioda osciliranja prati smanjenje frekvencije osciliranja, što također može ukazivati na oštećenja ili na promjene u uvjetima oslanjanja ili na gubitak sile prednapinjanja (slika 5.).
- To je u vezi i s porastom prigušenja konstrukcije, što opet može biti posljedica oštećenja (slika 6.).



Slika 4. Promjena perioda oscilacija sa starošću nadvožnjaka



Slika 5. Promjena vlastitih frekvencija oscilacija sa starošću nadvožnjaka



Slika 6. Promjena prigušenja konstrukcije sa starošću nadvožnjaka

4. Zaključak

Iz prethodno prikazanih rezultata mjerenja može se zaključiti sljedeće:

- Oštećeni mostovi, koji su stari 25 i 30 godina, imaju veće prigušenje od onih mlađih te se može očekivati to da se u njima nalaze određena oštećenja koja bi trebalo do kraja detektirati u daljnjim detaljnim ispitivanjima i istražnim radovima.
- Ti mostovi imaju i veće periode oscilacija, što upućuje na smanjenje momenta tromosti u glavnim nosačima, što pak može značiti pojavu pukotina te su potrebni daljnji istražni radovi.
- Vizualnim pregledom i dinamičkim ispitivanjima utvrđena su oštećenja na mostovima starima do 30 godina koja upućuju na potrebu za provođenjem daljnjih istražnih radova te za detaljnom analizom materijala u laboratoriju.
- Kako bi se dobila detaljnija slika o ponašanju mostova određene kategorije kroz vrijeme, trebalo bi izvesti više ispitivanja mostova jednake konstrukcije i jednake starosti jer bi se tako dobio veći statistički uzorak za obradu. Takva se ispitivanja planiraju provesti u vrlo skoroj budućnosti.

Literatura

- [1] Bien, J; Zwolski, J.: Dynamic Tests in Bridge Monitoring – Systematics and Applications, Poland: Wroclaw University of Technology, 2018.
- [2] Tkalčić, D.: Ocjena stanja betonskih mostova, Magistarski rad, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005.
- [3] Cornwell, P.J., Farrar, C.R., Doebling, S.W., Sohn H.: Environmental Variability of Modal Properties Experimental Techniques, pp. 45-48, Nov/Dec 1999.
- [4] Wahab, M.A., De Roeck, G.: Effect of Temperature on Dynamic System Parameters of a Highway Bridge. Structural Engineering International, 4 (1997), pp. 266-270.

Zaostajanje posmika kod čeličnih nosača

Hrvoje Vukoja¹, doc.dr.sc. Anđelko Vlašić²

¹ Metal-Projekt d.o.o., hvukoja1992@gmail.com

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, vlastic@grad.hr

Sažetak

Prilikom globalne analize čeličnih nosača oslonjenih kontinuirano preko više ležajeva (otvorenog ili zatvorenog poprečnog presjeka) potrebno je u obzir uzeti posmičnu deformabilnost pojasa proračunom sudjelujuće širine – utjecaj "zaostajanja posmika" (eng. *shear-lag*). U radu su uspoređene vrijednosti koeficijenta sudjelujuće širine duž nosača izračunane izrazima iz norme HRN EN 1993-1-5 te numeričkom analizom metodom konačnih elemenata. Za slučaj kontinuiranog opterećenja uzduž cijeloga nosača značajnije odstupanje postoji samo na drugom ležaju, dok je slučaj opterećenja parom koncentriranih sila dao manje vrijednosti sudjelujuće širine u poljima nosača. Ovaj rad je uvod u daljnje istraživanje ponašanja nosača sa zakrivljenim pojansom, za što su dane i početne smjernice.

Ključne riječi: čelični nosač, posmična deformabilnost, zaostajanje posmika, zakrivljeni pojas

Shear lag of steel girders

Abstract

During global analysis of multi-span girders resting on several bearings (of open or closed cross section), it is necessary to take into account the shear flexibility of the zone by calculating the effective width, i.e. the shear lag effect. The values of shear lag coefficient along girders, calculated via expressions given in HRN EN 1993-1-5, are compared with the corresponding values obtained by numerical analysis using the finite element method. For the case of continuous load along the entire girder, a significant deviation exists at the second bearing only, while lower effective width values were obtained in girder span zones in the case of loading with a pair of concentrated forces. This paper is an introduction to further research of girders with curved flanges, for which initial guidelines are given in this paper.

Key words: steel girder, shear flexibility, shear lag, curved flange

1 Uvod

Kod savijanja nosača sa zadovoljenim uvjetom $L/h < 5$ pretpostavlja se da vrijedi Bernoullijeva hipoteza ravnih presjeka - za linearno elastičan materijal ravni poprečni presjeci prilikom deformacije ostaju ravni iz čega proizlazi i linearna raspodjela normalnih naprezanja po visini poprečnog presjeka. Ova hipoteza u potpunosti je zadovoljena samo za slučaj "čistog" savijanja, za konstantnu vrijednost momenta savijanja uzduž nosača, pri čemu ne djeluje poprečna sila. Kod slučaja opterećenja nosača poprečnim silama, uslijed posmičnih naprezanja dolazi do posmične deformacije poprečnih presjeka, čime se narušava hipoteza ravnih presjeka.

Međutim, za spomenuti omjer visine i duljine nosača pokazano je da se utjecaj deformacije uslijed posmičnih naprezanja/deformacija može zanemariti te se u većini slučajeva proračun naprezanja i deformacija nosača može svesti na problem jedno-dimenzionalnog elementa s pripadnim fleksijskim krutostima. Pritom se, promatramo li tankostijene otvorene i zatvorene poprečne presjeke, zanemaruje plošno ponašanje hrptova i pojasnica te njihova posmična deformabilnost.

Promatramo li nosač opterećen poprečnim silama u ravnini svojih hrptova, savijanjem hrptova te uzdužnim pomacima vlakana na spoju s pojasnicom, u pojasnici dolazi do uzdužnih normalnih i horizontalnih posmičnih naprezanja pa samim time i poprečnih normalnih naprezanja (uslijed spriječenih pomaka).

Raspodjela posmičnog opterećenja na pojasnicu uzduž nosača uzima se kao da je afina dijagramu posmičnih sila, iako zbog posmične deformabilnosti pojasnice dolazi do preraspodjele momenata savijanja, a samim time i poprečnih sila duž nosača. Ne treba zaboraviti da i promjenjiva fleksijska krutost duž nosača ("pokrivanje" momenata savijanja prilikom dimenzioniranja nosača) dovodi do preraspodjele momenata savijanja.

Promatramo li sad posebno pojasnicu kao zaseban disk opterećen samo rubnim posmičnim opterećenjem, za relativno niske vrijednosti omjera (polovice) širine i duljine raspona (razmaka između nultočaka momentnog dijagrama) nosača praktički se može pretpostaviti jednolika raspodjela uzdužnih naprezanja po širini pojasnice (pojasnica se ponaša kao štap, a ekscentričnost je opterećenja zanemarena), dok je za veće omjere ($b_o/L_e > 0,02$ - slika 2.a i 2.b, prema HRN EN 1993-1-5) potrebno odrediti raspodjelu uzdužnih naprezanja po širini pojasnice. Uslijed posmične deformabilnosti pojasnice treba očekivati da će vlakna pojasnice bliža hrptu biti opterećenija od onih udaljenijih - ova pojava naziva se "zaostajanje posmika" (eng. *shear-lag*).

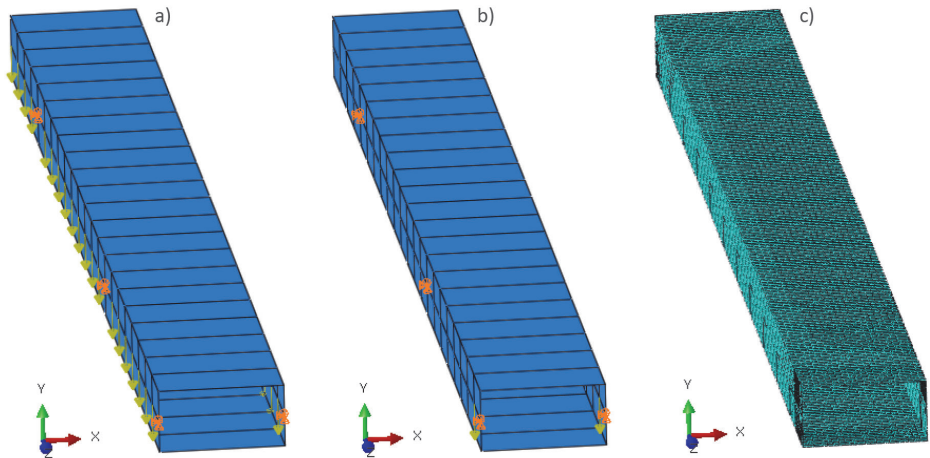
Stoga se uvodi koncept sudjelujuće širine $b_{eff} = \beta \cdot b_o$, kojim se posmična podatljivost pojasnice uzima u obzir isključivanjem dijela pojasnice udaljenijeg spoju s hrptom, uz zadovoljenje uvjeta ravnoteže uzdužne sile integriranjem naprezanja po širini pojasnice.

Proračunom širokopojasnih nosača, ne uzimajući u obzir zaostajanje posmika, nalazimo se na strani nesigurnosti, budući da je velika mogućnost podcjenjivanja vrijednosti naprezanja u spoju pojasnice s hrptom. Samim time podcjenjujemo i deformacije poprečnog presjeka te postoji mogućnost da se dio nosača plastificira bez naše namjere.

Budući da se čelični nosači velikih raspona uglavnom sastavljaju od vitkih limova, postoji problem stabilnosti uslijed djelovanja tlačnih naprezanja (osim ako se radi o poprečnom presjeku klase 3 ili manje prema HRN EN 1993-1-1). Takvi vitki limovi imaju uzdužne ukrute (otvorene ili zatvorene) koje sprječavaju izbočivanje i čija se uzdužna krutost prilikom proračuna sudjelujuće širine uzima u obzir izračunom koeficijenta ortotropije pojasnice α_0 . Uzdužne ukrute povećavaju samo udužnu krutost pojasnice, no ne i posmičnu, pa se time povećava efekt zaostajanja posmika kod takvih nosača.

2 Numerička analiza kontinuiranog čeličnog nosača

Izrađen je numerički model čeličnog nosača (programski paket Simulia Abaqus) sandučastog poprečnog presjeka, kontinuiranog preko raspona duljine 8,0 m i 10,0 m te s prepustom duljine 4,0 m (model kao u HRN EN 1993-1-5). Nosač je zglobno oslonjen na točkastim ležajevima u sredini hrpta te opterećen: a) kontinuiranim opterećenjem u ravnini hrptova uzduž cijelog nosača i b) "hodajućim" parom koncentriranih sila (po jedna na svakom hrptu) koje se kreću uzduž nosača. Poprečni presjek nosača je sanduk visine hrpta 1000 mm te debljine 10 mm i širine pojasa 2000 mm s debljinom 20 mm. Model je diskretiziran linearnim plošnim konačnim elementima veličine 100 x 100 mm. Budući da je model geometrijski i materijalno linearan, velike relativne vitkosti elemenata nemaju utjecaj na konačan traženi rezultat, jer koeficijent sudjelujuće širine ovisi samo o relativnim vrijednostima naprezanja u poprečnom presjeku (sva naprezanja mogu se izraziti kao postotak maksimalnog naprezanja).



Slika 1. a) Numerički model - rubni uvjeti i kontinuirano opterećenje; b) Prikaz jednog od položaja (uzduž nosača) "hodajućeg" para koncentriranih sila; c) Prikaz mreže konačnih elemenata

Iz rezultata numeričke analize izračunani su koeficijenti sudjelujuće širine duž nosača koristeći ravnotežu uzdužnih sila integriranjem diskretnih vrijednosti normalnih naprezanja (uzdužnih sila) u konačnim elementima:

$$\sum_{i=1}^n N_z = \sum_{i=1}^n \left(\sigma_{z,i} \times \frac{b_0}{n} \right) \times t = \sigma_{z,\max} \times b_{\text{eff}} \times t \quad (1)$$

Iz toga proizlazi

$$\beta = \frac{b_{\text{eff}}}{b_0} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{z,i}}{\sigma_{z,\max} \times n} \quad (2)$$

gdje su:

β - koeficijent sudjelujuće širine

b_{eff} - sudjelujuća širina pojasnice poprečnog presjeka nosača

b_0 - širina polovice pojasnice poprečnog presjeka nosača

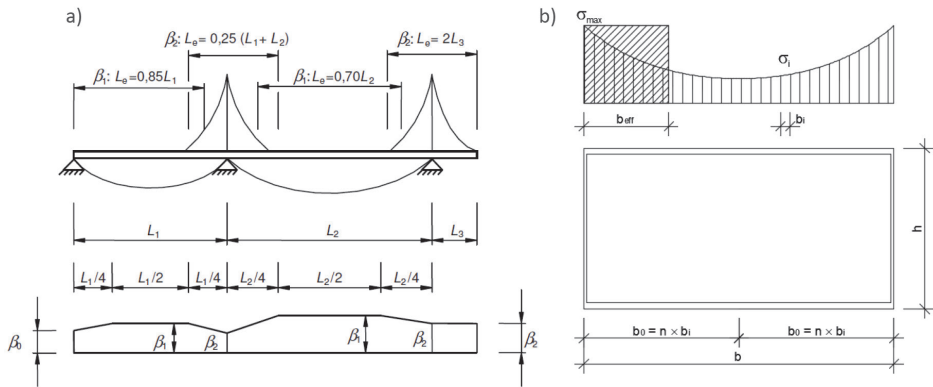
n - broj konačnih elemenata u širini polovice pojasnice

$\sigma_{z,i}$ - normalno naprezanje (prema globalnom koordinatnom sustavu) u konačnom elementu

$\sigma_{z,\max}$ - maksimalno normalno naprezanje (u elementu uz spoj pojasnice i hrpta)

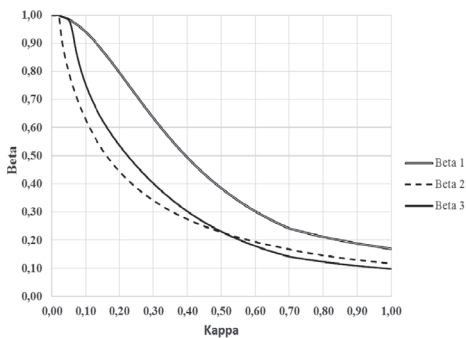
N_z - uzdužna sila konačnog elementa

t - debljina pojasnice (i plošnog konačnog elementa).

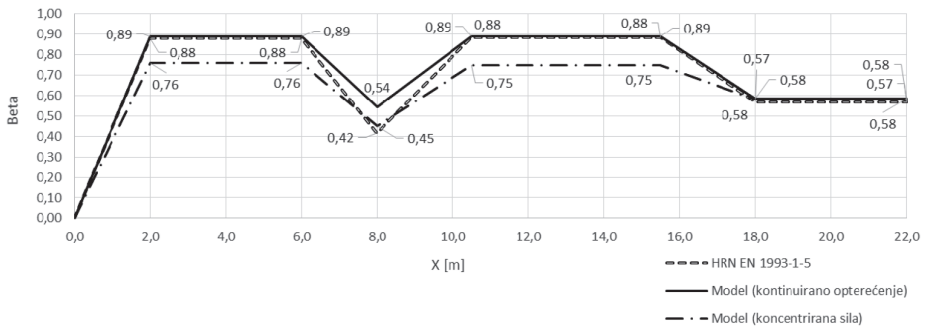


Slika 2. a) Statički sustav i raspodjela sudjelujućih širina [2]; b) "Stvarna" i zamjenska raspodjela naprezanja u pojasu

Dobiveni rezultati uspoređeni su s vrijednostima dobivenim izrazima prema [2], čiji je grafički prikaz zavisnosti sudjelujućih širina o κ (omjer b_0/L_e pomnožen koeficijentom ortotropije α_0) vidljiv na slici 3. U obzir su uzete samo vrijednosti dobivene integriranjem normalnih naprezanja poprečnih presjeka s maksimalnim/minimalnim momentima savijanja. Na rubnim poprečnim presjecima (početak i kraj nosača) sudjelujuće širine nisu tražene budući da su vrijednosti uzdužnih naprezanja zanemarive (moment savijanja je praktički jednak nuli) te se njihovim integriranjem dobivaju besmislene vrijednosti β . Vrijednosti sudjelujuće širine također nisu tražene ni u poprečnim presjecima između ekstrema funkcija momenata savijanja (blizu područja u kojima se nalaze nultočke), koji mogu biti djelomično u vlak i tlaku, jer zbog preraspodjele uzdužnih naprezanja uslijed zaostajanja posmika (a time i preraspodjele momenata savijanja) ne postoji idealna nultočka, tj. poprečni presjek okomit na os nosača u kojem su sva uzdužna naprezanja jednaka nuli. Integracijom naprezanja suprotnih predznaka (vlak i tlak) tada bi se također dobile besmislene vrijednosti β .



Slika 3. Koeficijenti sudjelujuće širine u ovisnosti o omjeru b_0/L_0 prema [2]



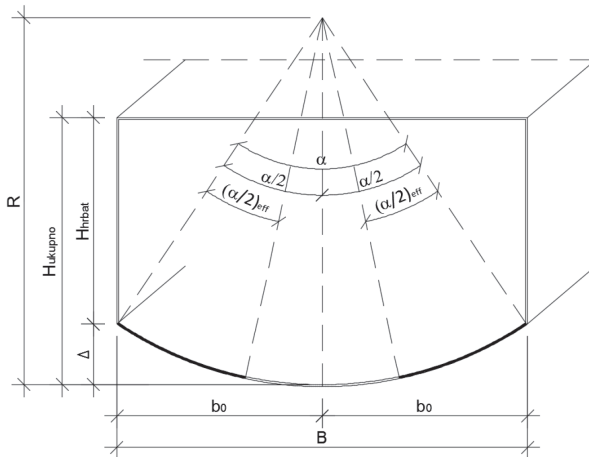
Slika 4. Usporedba vrijednosti sudjelujuće širine duž nosača koristeći rezultate dobivene numeričkom analizom modela s vrijednostima dobivenim izrazima iz [2] za isti nosač

Numeričkom analizom nosača za slučaj kontinuiranog opterećenja pokazana su mala odstupanja od vrijednosti dobivenih prema [2]. Osjetno odstupanje postoji samo na drugom ležaju nosača (22 %), što može biti posljedica preraspodjele momenata savijanja uslijed zaostajanja posmika te povećanog naprezanja u spoju hrpta s pojasnicom neposredno iznad ležaja. Za slučaj "hodajućeg" para koncentriranih opterećenja izračunane su vrijednosti sudjelujućih širina uzduž cijelog nosača za sve položaje para sila. Na temelju familije krivulja određena je anvelopa s minimalnim vrijednostima sudjelujuće širine uzduž nosača (najveći efekt zaostajanja posmika). Vrijednosti u poljima nosača su 15 % manje nego za slučaj kontinuiranog opterećenja zbog velikih posmičnih deformacija te "skoka" u dijagramu posmičnih sila na mjestu djelovanja koncentrirane sile - efekt sličan ponašanju nosača na ležaju. Usporedba vrijednosti sudjelujuće širine duž nosača koristeći rezultate dobivene numeričkom analizom modela s vrijednostima dobivenim izrazima iz [2] za isti nosač prikazana je na slici 4.

3 Smjernice za daljnje istraživanje - analiza nosača sa zakrivljenim pojasom

Poseban slučaj je širokopojasni nosač sa zakrivljenim pojasnicama, često korišten u mostogradnji zbog povoljnog aerodinamičkog oblika te iz estetskih razloga, slika 4. Kod takvog nosača, uz pretpostavku da je omjer L/h takav da se hrptovi ponašaju u skladu s hipotezom ravnih presjeka, postoji prirast/pad naprezanja po širini pojasa ne samo zbog posmične deformabilnosti pojasa, već i zbog udaljavanja/približavanja vlakana pojasa neutralnoj osi, ovisno o tome radi li se o konkavnoj ili konveksnoj zakrivljenosti. U praksi se uglavnom susrećemo s konveksnim zakrivljenostima donjih pojasa nosača, pa je potrebno pronaći zakon raspodjele uzdužnih naprezanja po širini pojasnice, uzimajući u obzir parametre zakrivljenosti pojasa, njegove širine te raspone nosača. Za niske vrijednosti radijusa zakrivljenosti pojasa utjecaj

će smanjenja zaostajanja posmika (udaljavanjem od spoja s hrptom povećava se i udaljenost od neutralne osi) biti znatan, a za visoke vrijednosti (približavanje formi ravnog pojasa) utjecaj će smanjenja biti neznatan. Stoga se uvodi pojam "sudjelujućeg kuta" pojasa (definira dio luka koji će ostati "aktivan"), no u ovom slučaju, osim što mora biti zadovoljen uvjet ravnoteže uzdužnih sila, uzdužna naprezanja efektivnog dijela pojasa (svedenog na maksimalno naprezanje pojasa) moraju imati jednak rezultirajući moment savijanja na proizvoljnu točku kao i integrirana naprezanja dobivena numeričkom analizom plošnih elemenata.



Slika 5. Skica poprečnog presjeka nosača sa zakrivljenim donjim pojaskom (radijus zakrivljenosti R)

4 Zaključak

U radu su uspoređene vrijednosti sudjelujuće širine izračunane izrazima iz [2] te numeričkom analizom pomoću metode konačnih elemenata. Za slučaj kontinuiranog opterećenja duž cijelog nosača vrijednosti se sudjelujuće širine uglavnom (uz relativno mala odstupanja) podudaraju s analitički dobivenim vrijednostima iz [2] (osim na drugom ležaju). Međutim, slučaj opterećenja parom koncentriranih sila u poljima dao je manje vrijednosti sudjelujuće širine od onih dobivenih za slučaj kontinuiranog opterećenja zbog velikih posmičnih deformacija te "skoka" u dijagramu posmičnih sila na mjestu djelovanja koncentrirane sile. Ovaj rad uvod je u daljnje istraživanje širokopojsnih nosača, ali sa zakrivljenim pojaskima, gdje po širini pojasnice dolazi do nejednolike raspodjele normalnih naprezanja ne samo zbog utjecaja zaostajanja posmika, već i zbog udaljavanja od neutralne osi poprečnog presjeka. U računalnom programu provest će se parametarska analiza nosača s različitim raspodjelama, širinama i radijusima zakrivljenosti pojasa.

Literatura

- [1] Ivanyi, M., Skaloud, M.: *Steel plated structures*, Springer-Verlag Wien, 1995, Originally published by CISM, Udine, 1995.
- [2] European Committee for Standardization (CEN): *EN 1993-1-5 (2006): Design of steel structures - Part 1-5: General rules - Plated structural elements*, 2006.
- [3] Abaqus v.6.7-6.12.: *Analysis Users Manual & Theory manual*, Dassault Systemes Simulia Corp.
- [4] Johansson, B., Maquoi, R., Sedlacek, G., Müller, C., Beg, D.: *Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 „Plated structural elements“*, European Communities, Italy, 2007.
- [5] Guggenberger, W.: *Flächentragwerke - Vorlesungsunterlagen*, Technische Universität Graz, Graz, 2016.
- [6] Timoshenko, S., Goodier, J.N.: *Theory of elasticity*, McGraw-Hill Book Company, Inc., USA, 1951.
- [7] Šimić, V.: *Otpornost materijala 1*, Sveučilište u Zagrebu, Školska knjiga, Zagreb, 2002.

Kvantificiranje utjecaja linijskih toplinskih mostova metodom infracrvene termografije

Mergim Gaši¹, doc.dr.sc. **Bojan Milovanović²**

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, mgasi@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, bmilovanovic@grad.hr

Sažetak

Među najvažnijim parametrima za proračun toplinskih gubitaka u zgradi zasigurno su koeficijent prolaska topline, U , i duljinski koeficijent prolaska topline Ψ . U ovom radu se za određivanje koeficijenta Ψ koristi metoda infracrvene termografije (ICT), i to za postojeće zgrade sa stvarnim utjecajima toplinskih mostova. Rezultat mjerenja je termogram iz kojeg je moguće očitati parametre potrebne za kvantificiranje utjecaja toplinskog mosta, uz istovremeno mjerenje temperature unutrašnjeg i vanjskog zraka. Tom metodom se na jednostavan, brz i učinkovit način mogu odrediti stvarni toplinski gubici kroz najslabija mjesta na vanjskoj ovojnici zgrade – toplinske mostove.

Ključne riječi: toplinski mostovi, infracrvena termografija, toplinski gubici, zgrada, toplinska izolacija

Quantification of linear thermal bridges using infrared thermography method

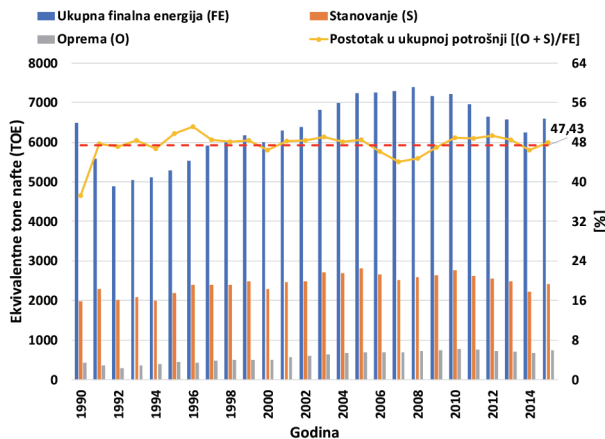
Abstract

One of the most important parameters for calculating heat losses in buildings is definitely the heat transfer coefficient, U , and the linear thermal transmittance, Ψ . This paper proposes a method based on infrared thermography (IRT) for calculating the Ψ value for the existing buildings with real impacts of thermal bridges. The result is presented via a thermogram showing the parameters required to quantify the influence of thermal bridges, while simultaneously measuring the indoor and outdoor air temperature. This method represents a quick and effective tool for defining actual heat losses through the weakest zones along the external envelope of buildings – thermal bridges

Key words: thermal bridges, infrared thermography, heat losses, building, thermal insulation

1 Uvod

U pogledu potrošnje energije građevinski sektor je jedan od najznačajnijih potrošača – 40 % ukupno potrošene energije otpada na zgrade [1]. U Hrvatskoj je taj iznos čak i veći pa je 2015. godine iznosio 47,97 % od ukupne finalne energije potrošene u toj godini (slika 1.), uzevši u obzir potrošnju za stanovanje i opremu zgrade. Kvalitetno izvođenje građevinskih radova može biti skupo, a i vremenski zahtjevno. Razlog tome može biti nepristupačnost građevinskih elemenata na kojima se pojavljuju toplinski mostovi – potrebno je postaviti skelu kako bi se fizički došlo do nedostataka koji uzrokuju toplinske mostove. Nadalje, ako se toplinski most otkrije snimanjem infracrvenom kamerom, teško je odrediti njegovu ozbiljnost. U ovom radu opisan će se teoretski postupak koji bi se mogao primijeniti kod kvantificiranja utjecaja linijskih toplinskih mostova, a buduće publikacije će se bazirati na primjerima korištenja opisane metode. Infracrvena termografija (ICT) je jedna od načina na koji je moguće ocijeniti trenutačno stanje vanjske ovojnice zgrade [2]. U posljednje vrijeme metoda ICT je sve više primjenjivana u području energetske učinkovitosti, kako za ocjenjivanje prihvatljivosti primijenjenih rješenja, tako i za pronalaženje nedostataka u elementima zgrade – pukotina [3] i mjesta s povećanom vlažnosti [4]. Metodu je čak moguće i koristiti za in situ određivanje koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) [5-7].



Slika 1. Potrošnja energije u Hrvatskoj u periodu od 1990. do 2015. (prema podacima iz [1])

IC termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela. Temelji se na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja s promatrane površine. Rezultat termografskog mjerenja je termogram, koji u sivim tonovima ili nekom kodu boja daje sliku temperaturne raspodjele na površini promatranog objekta. Temperaturna raspodjela posredno daje informaciju o različitim

stanjima same površine ili je pak odraz strukture i unutrašnjeg stanja promatranog objekta [8].

Budući da je metoda ICT klasificirana kao nerazorna, može se primijeniti u velikom broju slučajeva – monitoring strojeva (pregrijavanje), medicinsko snimanje, satelitsko snimanje, provjera električnih instalacija, mikro-termografija elektronskih dijelova, provjera pregrijavanja fotonapona, optimizacija sustava te, naravno, u termografskom snimanju zgrada [9].

U normi HRN EN ISO 10211 toplinski most je definiran kao manje područje u omotaču grijanog dijela zgrade kroz koje je toplinski tok povećan zbog promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela zgrade [10]. Gibanje fluida kroz elemente zgrade uzrokuje promjenu temperature u samom elementu i na njegovoj površini. Primjeri toga se najbolje očituju na područjima toplinskih mostova: u gibanju zraka kroz nebrtvljene spojeve unutarnjih zidova s vanjskom ovojnicom zgrade, spojeve vanjske ovojnice s prozorima ili vratima [11] ili na mjestima prodora vlage uzrokovane infiltracijom kiše ili kapilarnim upijanjem vode iz tla [12]. Nadalje, povećan toplinski tok na vanjskoj ovojnici zgrade može nastati zbog nezaštićenih elemenata konstrukcije (ploče, grede) koji probijaju sloj toplinske izolacije, te na taj način uzrokuju toplinske mostove.

Osim velikog utjecaja toplinskih mostova na potrošnju energije u zgradama, toplinski mostovi, kao jedni od najkritičnijih mjesta na vanjskoj ovojnici zgrade, predstavljaju rizik od nastanka plijesni u zimskom periodu zbog smanjenja površinske temperature na unutrašnjoj površini elementa [10]. Smanjenje površinske temperature je uzrokovano smanjenjem toplinskog otpora na području toplinskog mosta u odnosu na ostatak elementa. Toplinski otpor se može smanjiti zbog promjene koeficijenta toplinske provodljivosti na spoju dva građevna materijala, zbog prisutnosti zračnih pukotina, zbog toplinsko nezaštićenih konstrukcijskih elemenata, na mjestima potpunih ili djelomičnih prodora vanjske ovojnice zgrade materijalima s različitim toplinskim svojstvima, zbog promjene debljine materijala, zbog razlike između unutarnje i vanjske površine – spojevi poda, zida, stropa.

Kod projektiranja toplinskih mostova proračun se izvodi prema normama HRN EN ISO 10211 i HRN EN ISO 14683. Norma HRN EN ISO 14683 daje pojednostavljen proračun toplinskih mostova za karakteristične linijske toplinske mostove u zgradarstvu [13], a za detaljniji proračun primjenjuje se norma HRN EN ISO 10211. Kod obje norme se prilikom proračuna utjecaja toplinskih mostova pretpostavljaju stacionarni uvjeti prolaska topline. Nadalje, kod proračuna toplinskih mostova se gubitci topline kroz točkaste toplinske mostove mogu zanemariti u odnosu na gubitke kroz linijske toplinske mostove [13]. Parametri koji se uzimaju u obzir prilikom proračuna toplinskog mosta su parametri vezani uz rubne uvjete – temperatura unutrašnjeg i vanjskog zraka, geometrija elementa (dimenzije), te materijalne i toplinske karakteristike elemenata (toplinska provodljivost, U-vrijednost...).

2 Metoda infracrvene termografije

Proces prijenosa topline prilikom snimanja termografskom kamerom prikazan je na slici 2., [14]. Ukupna energija zračenja koju kamera registriira dana je izrazom (1):

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad (1)$$

gdje je:

W_{tot} - ukupna energija zračenja koja dopiye do kamere prilikom fokusiranja na mjerenu površinu, [J]

W_{obj} - energija koju promatrana površina zrači prema kameri, [J]

W_{refl} - energija okoliša koja se reflektira od promatrane površine, [J]

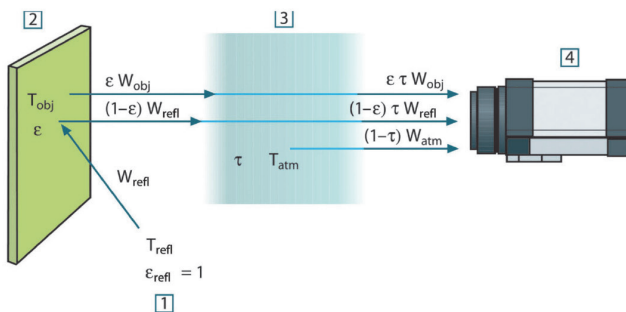
W_{atm} - energija koju emitira atmosfera između promatrane površine i infracrvene (IC) kamere, [J]

τ - koeficijent transmisije atmosfere

ε - koeficijent emisivnosti promatrane površine.

Dio zračenja koji se emitira od promatrane površine do kamere izgubi se zbog transmisivnosti atmosfere. Jedini član u jednadžbi (1) koji je bitan za kvantificiranje utjecaja toplinskog mosta na površini elementa je W_{obj} koji je funkcija površinske temperature. Preostala dva člana (W_{refl} i W_{atm}) se odnose na dodatna zračenja u okolini elementa. W_{refl} ovisi o temperaturama ostalih tijela koja se nalaze u okolini promatrane površine i o samim svojstvima površine, a W_{atm} ovisi o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, te o udaljenosti kamere od mjerene površine.

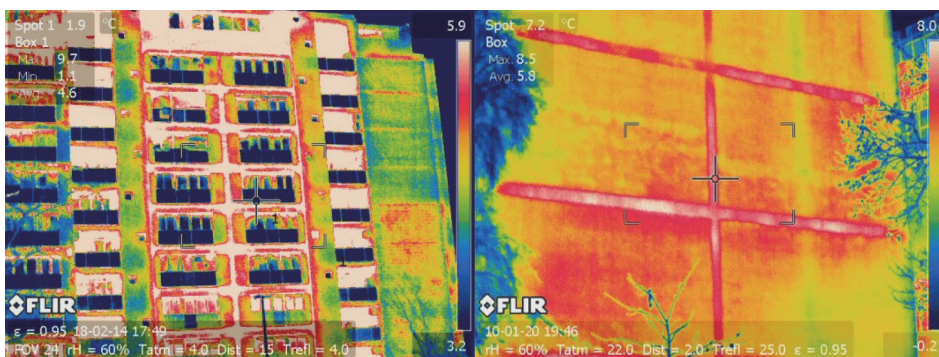
Za što bolju interpretaciju fizikalnog modela prolaska topline pomoću infracrvene termografije potreban je niz parametara: prije samog mjerenja potrebno je odrediti koeficijent emisivnosti površine i reflektiranu temperaturu T_{refl} , temperaturu i relativnu vlažnost zraka te udaljenost kamere od promatrane površine [15]. Iz određene emisivnosti površine i reflektirane temperature može se iz termograma odrediti točna temperatura na površini toplinskog mosta.



Slika 2. Shematski prikaz mjerenja termografskom kamerom (1 - okoliš, 2 - mjereni objekt, 3 - atmosfera, 4 - IC kamera) [14]

3 Izrazi korišteni za kvantificiranje utjecaja toplinskog mosta pomoću metode ICT

Svaki termogram snimljen pomoću infracrvene kamere daje zapis zračenja pojedinog piksela koje dolazi na IC kameru s predmeta i njegove okoline. Skup svih piksela na slici čini polje dozračene energije promatrane površine [15]. Kod infracrvenog snimanja elemenata zgrade radi određivanja toplinskih gubitaka uzrokovanih toplinskim mostovima preporuča se minimalna temperaturna razlika između vanjskog i unutarnjeg okoliša od 10 °C [16]. Primjer vidljivosti toplinskih mostova pri većoj razlici temperatura je, npr., za vrijeme sezone grijanja – toplinske mostove je lakše detektirati (slika 3.).



Slika 3. Primjeri linijskih toplinskih mostova

Toplinski mostovi u zgradi se najčešće pojavljuju na spoju građevinskih elemenata ili na mjestu na kojemu se mijenja sastav elementa (promjena materijala). Na tim mjestima dolazi do:

- promjene toplinskog toka i
- promjene u unutarnjoj i vanjskoj površinskoj temperaturi.

Prijenos topline kroz toplinske mostove obično je trodimenzionalan ili dvodimenzionalan. Kod dvodimenzionalnog toplinskog toka utjecaj se toplinskog mosta prikazuje na osnovi duljinskog koeficijenta prolaska topline Ψ [W/mK], prema izrazu (2). Slika 4. prikazuje parametre potrebne za određivanje koeficijenta Ψ .

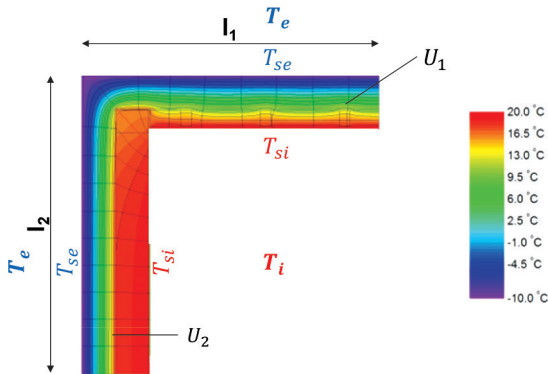
$$\Psi = L_{2D} - \sum_{k=1}^n U_k \cdot l_k \quad (2)$$

gdje je:

L_{2D} - koeficijent toplinske veze dobiven iz 2D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša, [W/mK]

U_k - plošni koeficijent prolaska topline 1D komponente k koja razdvaja dva promatrana okoliša, [W/m²K]

l_k - duljina na koju se odnosi vrijednost U_k , [m]
 N - broj 1D komponentata.



Slika 4. Prikaz parametara za proračun koeficijenta ψ

Toplinski se mostovi dakle kvantificiraju koeficijentom Ψ koji je jednak povećanju stacionarnog toplinskog toka kroz linijski toplinski most, u odnosu na neporemećeno stanje. S obzirom na to da koeficijent Ψ toplinskog mosta određuje površinsku temperaturu elementa koja se može mjeriti pomoću infracrvene kamere, teoretski je moguće iz poznatog temperaturnog polja kvantificirati utjecaj toplinskog mosta preko koeficijenta učestalosti toplinskog mosta l_{tb} [15] i duljinskog koeficijenta prolaska topline Ψ . U nastavku će biti prikazan teoretski raspis izraza na osnovi kojih bi se trebali moći odrediti koeficijenti Ψ i l_{tb} toplinskog mosta.

U neporemećenom dijelu konstrukcije, dalje od područja toplinskog mosta, toplinski tok se može pretpostaviti jednodimenzionalnim. Koeficijent prolaska topline, U [W/m²K], iz izraza (2) se, u tom području, računa pomoću izraza (3):

$$U_k = \frac{h_{out} \cdot (T_k - T_{out})}{T_{in} - T_k} \quad (3)$$

gdje je:

h_{out} - vanjski plošni koeficijent prijelaza topline, [W/m²K]

T_k - je površinska temperatura vanjskog k-tog sloja, [K]

T_{out} - temperatura vanjskog zraka, [K]

T_{in} - temperatura unutrašnjeg zraka, [K].

Izraz (3) vrijedi za slučaj toplinski tok usmjeren od vanjske površine prema unutrašnjosti zgrade, tj. kada je vanjska temperatura veća od unutarnje. Ako se pretpostavi da je toplinski tok koji prolazi kroz građevinski element generiran zračenjem i strujanjem, tada se prijenos topline opisuje izrazima (4) i (5):

$$P_{conv} = h_{out} \cdot A \cdot (T_k - T_{out}) \quad (4)$$

$$P_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_e - T_{refl})^4 \quad (5)$$

gdje je:

P_{conv} - snaga toplinskog toka od zračenja, [W]

P_{rad} - snaga toplinskog toka od strujanja, [W]

A - površina kroz koju se odvija toplinski tok, [m²]

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta koja iznosi $5,67e^{-8}$ W/m²K⁴.

Ukupana snaga toplinskog toka se pretpostavlja jednakoj snazi toplinskog toka P_{cond} [W] koji prolazi kroz k -ti 1D sloj prema izrazu (6):

$$P_{cond} = U_k \cdot A \cdot (T_{in} - T_k) \quad (6)$$

pretpostavljajući pritom da je se unutarnja temperatura k -tog 1D sloja jednaka unutarnjoj temperaturi zraka u neposrednoj blizini promatrane površine, te da se vanjska površinska temperatura tog istog sloja mjeri pomoću IC kamere. Izraz (3) moguće je dobiti izjednačavajući izraz (6) s izrazom (4) – pritom se zanemaruje toplinski tok zračenjem jer je utjecaj radijacije pri malim razlikama temperature zanemariv u odnosu na strujanje i vođenje. Snaga toplinskog toka zračenjem za jediničnu površinu pri razlici temperatura od 1 K, za crno tijelo ($\varepsilon = 1$), jednaka je $5,67e^{-8}$ W, dok je za istu površinu i razliku temperatura, uz koeficijent $h_{out} = 25$ W/m²K, snaga toplinskog toka strujanjem jednaka 25 W. Tako dobiven koeficijent prolaska topline (U-vrijednost) opisan je u normi HRN EN ISO 6946 [17]. Za detaljniji proračun U-vrijednosti potrebno je koristiti numeričke simulacije u skladu s normom HRN EN ISO 10211 [10]. Koeficijent h_{out} [W/m²K] u izrazima (3) i (4) u sebi sadrži samo doprinose od strujanja fluida po površini elementa i može se uzeti iz norme HRN EN ISO 6946. Ako se dodatno želi uzeti i prisilno strujanje fluida po površini, tada se h_{out} može izračunati pomoću izraza (7):

$$h_{out} = 4 + 4 \cdot v \quad (7)$$

gdje je v [m/s] brzina vjetra uz površinu vanjskog k -tog 1D sloja.

Koeficijent toplinske veze se određuje pomoću izraza (8) [10]:

$$L_{2D} = \frac{q}{(T_{in} - T_{out})} \quad (8)$$

gdje je q [W/m] toplinski tok po metru duljine toplinskog mosta vidljivog IC kamerom na vanjskoj površini ovojnice zgrade. Izračunava se pomoću izraza (9):

$$q = \frac{(T_{tb} - T_{outtb}) \cdot l}{R_{se}} \quad (9)$$

gdje je:

T_{tb} - temperatura očitana IC kamerom na površini toplinskog mosta, [K]

l_{tb} - širina toplinskog mosta ako je toplinski most vertikalni ili visina toplinskog mosta ako je toplinski most horizontalan, [m]

R_{se} - vanjski plošni otpor prolaskutopline, [m²K/W].

Uvrštavanjem izraza (8) i (9) u izraz (2) dobiva se konačan izraz za računanje koeficijenta Ψ :

$$\Psi_{out} = \frac{(T_{tb} - T_{outtb}) \cdot l}{R_{se} \cdot (T_{in} - T_{out})} - \sum_{k=1}^n \frac{h_{out} \cdot (T_k - T_{out})}{T_{in} - T_k} \cdot l_k \quad (10)$$

U slučaju da se toplinski mostovi snimaju IC kamerom s unutarnje strane zgrade, tada izraz (10) glasi:

$$\Psi_{in} = \frac{(T_{in} - T_{tb}) \cdot l_{tb}}{R_{si} \cdot (T_{in} - T_{outin})} - \sum_{k=1}^n \frac{h_{in} \cdot (T_{in} - T_k)}{T_{in} - T_k} \cdot l_k \quad (11)$$

gdje je:

R_{si} - unutarnji plošni otpor prolasku topline, [m²K/W]

h_{in} - unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline unutarnjeg k-og 1D sloja, [W/m²K]

T_k - unutarnja površinska temperatura k-tog sloja, [K].

Drugi način određivanja koeficijenta Ψ je na osnovi koeficijenta učestalosti toplinskog mosta l_{tb} . Iz digitalnog zapisa IC kamere (termograma) moguće je očitati temperaturu pojedinog piksela na području toplinskog mosta $T_{pixel,si}$ [K], te svakom pikselu može se teoretski pridijeliti površina A_{piksel} [m²]. Određivanje piksela koji pripadaju toplinskom

mostu u pravilu nije baš jednostavno jer je teško prosuditi do kud je točno utjecaj toplinskog mosta prisutan. Zamjenska širina toplinskog mosta može se odrediti iz razmaka točaka infleksije krivulje koja aproksimira temperaturu očitanu u smjeru širine toplinskog mosta (npr. polinomom). Površina toplinskog mosta je zatim jednaka površini pravokutnika duljine l_{tb} i širine b (razmak točaka infleksije). Ukupna snaga toplinskog toka P_{tb} [W] na čitavom području toplinskog mosta jednaka je:

$$P_{tb} = h_{tb,i} \cdot A_{\text{piksel},i} \cdot \sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{\text{piksel},si,j}) \quad (12)$$

Ako se s N ($j = 1 \dots N$) označi ukupan broj piksela koji čine toplinski most na termogramu, tada se ukupna površina toplinskog mosta računa pomoću jednadžbe (13). Nadalje, plošni koeficijent prijelaza topline može se pretpostaviti konstantnim i označiti sa h_{tb} [W/m²K] s obzirom na to da je termogram snimljen u istom trenutku za cijelo područje.

$$A_{1D} = N \cdot A_{\text{piksel}} \quad (13)$$

Koeficijent učestalosti toplinskog mosta l_{tb} predstavlja omjer snage toplinskog toka u realnom slučaju (s toplinskim mostom) u odnosu na slučaj bez prisutnosti toplinskog mosta, izraz (14):

$$l_{tb} = \frac{P_{tb}}{P_{1D}} = \frac{h_{tb,i} \cdot A_{\text{piksel},i} \cdot \sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{\text{piksel},si,j})}{h_{1D} \cdot A_{1D} \cdot (T_i - T_{1D,si})} \quad (14)$$

Uvrštavanjem izraza (13) u izraz (14) i s pretpostavkom da je $h_{1D} = h_{tb}$ slijedi:

$$l_{tb} = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{i,j} - T_{\text{piksel},si,j})}{N \cdot (T_i - T_{1D,si})} \quad (15)$$

Izraz (15) osim toplinskih gubitaka uzrokovanih toplinskim mostom može prikazati i povećanje koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti) zbog prisutnosti toplinskog mosta:

$$U_{tb} = U_{1D} \cdot l_{tb} \quad (16)$$

Veza između koeficijenta l_{tb} i Ψ se dobije iz odnosa povećanog stacionarnog toplinskog toka kroz linijski toplinski most, u odnosu na neporemećeno stanje, izraz (17):

$$I_{tb} = \frac{Q + \Psi}{Q} \quad (17)$$

gdje Q [W/mK] predstavlja toplinski tok bez prisutnosti toplinskog mosta.

Za toplinski most sa slike 4. koeficijent Ψ bi glasio:

$$\Psi = (I_{tb} - 1) \cdot (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) \quad (18)$$

4 Zaključak

Određivanje duljinskog koeficijenta prolaska topline Ψ predstavlja velik problem u pogledu energetske učinkovitosti s obzirom na to da mnogi projektanati kod proračuna toplinskih gubitaka kroz toplinske mostove koriste paušalne dodatke, te vrijednosti dane u atlasima toplinskih mostova i normama koje se odnose na određene tipove toplinskih mostova. Takav način proračuna u pravilu daje prevelike vrijednosti koeficijenta Ψ , pa samim time i prevelike toplinske gubitke. Kod zgrada gotovo nulte energije (nZEB) i pasivnih kuća, malo odstupanje stvarne vrijednosti koeficijenta Ψ od vrijednosti uzete pojednostavljenim proračunom može značiti veliku razliku u stvarnoj potrošnji energije zgrade.

Analiza toplinskih mostova pomoću metode ICT je uobičajena u dijagnosticiranju toplinskih svojstava zgrade, ali samo u pogledu pronalaženja toplinskih mostova. Postupak opisan u ovom radu je poprilično jednostavan i mogao bi biti koristan pri ocjenjivanju toplinskih gubitaka bez korištenja kompliciranih numeričkih modela i opreme (za mjerenja gustoće toplinskog toka). Prikazana metoda može se koristiti samo u slučaju određivanja toplinskih gubitaka kroz toplinske mostove na postojećim zgradama.

Tijekom mjerenja treba očitati temperaturu unutrašnjeg i vanjskog zraka, a površinska temperatura elemenata se očitava pomoću infracrvene kamere, iz termograma – s unutarnje ili vanjske strane zgrade. Problem nastaje pri određivanju površine toplinskog mosta jer je teško prosuditi koji piksel pripada toplinskom mostu, a koji ne pripada. Nadalje, metoda ICT može se koristiti i pri određivanju koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti) građevinskih elemenata in situ. Kod te metode se kontinuirano mjere isti parametri potrebni za kvantificiranje utjecaja toplinskog mosta pa je moguće osim jednog parametra, U-vrijednosti, dobiti dva parametra koji najviše pridonose toplinskim gubitcima u zgradi, U-vrijednost i koeficijent Ψ .

Jedan od problema koji se javlja kod ove metode jest određivanje visine/širine toplinskog mosta s obzirom na to da nije uvijek jednostavno iz termograma očitati potrebne podatke – nije moguće fizički izmjeriti visinu/širinu toplinskog mosta već je potrebno iz termograma izračunati potrebne dimenzije preko položaja kamere

(njenog nagiba, udaljenosti od mjerene površine), te položajima piksela na slici u odnosu na referentne točke kojima znamo stvarne koordinate.

Koeficijent ψ određen na ovaj način izračunan je uz pretpostavku stacionarnih uvjeta prolaska topline, a ti uvjeti u stvarnosti ne postoje. Potrebno je prije samog mjerenja građevinski element dovesti u kvazistacionarne uvjete okoliša. U stvarnosti je takve uvjete vrlo teško postići. Druga opcija je kontinuirano mjerenje potrebnih temperatura u određenom vremenskom intervalu, te statistička obrada dobivenih rezultata. To dovodi do dodatnih problema jer se u tom slučaju plošni koeficijent prijelaza topline ne može smatrati konstantom nego ga treba dovesti u korelaciju s brzinom vjetra po površini – koja postaje dodatni parametar koji je potrebno kontinuirano bilježiti.

Literatura

- [1] Eurostat, TSDPC320|Final energy consumption by sector. Dostupno na: <https://www.econdb.com/dataset/TSDPC320/>. [Pristupljeno: 26-lip-2018].
- [2] Lehmann, B., Ghazi Wakili, K., Frank, T., Vera Collado, B., Tanner, C.: Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings, *Applied Energy*, 110 (2013), pp. 29–43, 2013.
- [3] Milovanović, B.: Application of Infrared Thermography for Defect Characterization in Reinforced Concrete, University of Zagreb, Faculty of civil engineering, 2013.
- [4] Rosina, E., Spodek, J.: Using infrared thermography to detect moisture in historic masonry: a case study in Indiana, *APT Bulletin*, 34 (2003) 1, pp. 11–16, 2003.
- [5] Nardi, I., Sfarra, S., Ambrosini, D.: Quantitative thermography for the estimation of the U-value: State of the art and a case study, *Journal of Physics: Conference Series*, 547 (2014) 1.
- [6] Ohlsson, K.E.A., Olofsson, T.: Quantitative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface, *Applied Energy*, 134 (2014), pp. 499–505.
- [7] Choi, D.S., Ko, M.J.: Comparison of various analysis methods based on heat flowmeters and infrared thermography measurements for the evaluation of the in situ thermal transmittance of opaque exteriorwalls, *Energies*, 10 (2017) 7.
- [8] Zore, Z.: Infracrvena termografija, *Lijecnicki Vjesnik*, 134 (2012) 5–6, pp. 194–195.
- [9] InfraTec, No Title, Dostupno na: <https://www.infratec-infrared.com/thermography/industries-applications/>. [Pristupljeno: 28-lip-2018].
- [10] Croatian Standard Institute, *HRN EN ISO 10211 - Toplinski mostovi u zgradarstvu - Toplinski tokovi i površinske temperature - Detaljni proračuni*. Zagreb, 2017.

- [11] Dudić, S.P., Ignjatović, I.M., Šešlija, D.D., Blagojević, V.A., Stojiljković, M.M.: Leakage quantification of compressed air on pipes using thermovision, *Thermal Science*, 16 (2013) SUPPL.2, pp. 555–565.
- [12] Barreira, E., De Freitas, V. P., Delgado, J.M.P.Q., Ramos, N.M.M.: Thermography Applications in the Study of Buildings Hygrothermal Behaviour, pp. 171–192, 2008.
- [13] Croatian Standard Institute, HRN EN ISO 14683 - Toplinski mostovi u zgradarstvu - Linearni koeficijent prolaska topline - Pojednostavljene metode i zadane utvrđene vrijednosti
- [14] Flir Systems, FLIR Thermal Camera ETS - 320 , pp. 96, 2017.
- [15] Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, F.: A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings, *Applied Energy*, 97 (2012), pp. 365–373.
- [16] RESNET, Interim Guidelines for Thermographic Inspections of Buildings, pp. 31, 2012.
- [17] Croatian Standard Institute, *HRN EN ISO 6946 - Građevni djelovi i građevni elementi - Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline - Metode proračuna*. Zagreb, 2017.

Primjena pepela drvene biomase u cementnim kompozitima

Karmen Kostanić Jurić¹, prof.dr.sc. Nina Štirmer²

¹ Tomting 2010 d.o.o., kostanic.karmen@gmail.com

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, ninab@grad.hr

Sažetak

U procesu izgaranja biomase nastaju značajne količine pepela. Približno 70 % pepela drvene biomase (PDB) odlaže se na odlagalištima što predstavlja ekološki i ekonomski problem. Trendovi u obnovljivim izvorima energije su rastući te je logično očekivati i porast broja energana na biomasu što će kao posljedicu imati i povećanje količina PDB-a. Dok energetska industrija traži rješenja za odlaganje pepela, cementna industrija je u potrazi za materijalima kojima se može zamijeniti dio prirodnih sirovina. Dosadašnja istraživanja pokazala su potencijal u povezivanju ovih dviju industrija te primjenu PDB-a u cementnim kompozitima. U ovom radu dan je sažet pregled dosadašnjih istraživanja iz ovog područja.

Ključne riječi: pepeo drvene biomase, obnovljivi izvori energije, otpad, kemijski sastav, mehanička svojstva, cementni kompoziti

Application of wood biomass ash in cement composites

Abstract

Significant quantities of ash are generated during the biomass combustion process. Around 70 % of wood biomass ash (WBA) is deposited at landfills, which constitutes an environmental and economic problem. The trends in using renewable energy sources are gathering momentum, and it may reasonably be expected that the number of biomass power plants will increase, which will result in higher quantities of WBA. While the energy industry is looking for ash disposal solutions, the cement industry is seeking materials that can partly replace natural raw materials. Current research shows that there is good potential for linking these two industries and applying WBA in cement composites. A summary of research conducted in this area is presented in the paper.

Key words: wood biomass ash, renewable energy sources, waste, chemical composition, mechanical properties, cement composites

1 Uvod

Direktiva 2009/28/EZ Europskog parlamenta i vijeća od 23. travnja 2009. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora te o izmjeni i kasnijem stavljanju izvan snage direktiva 2001/77/EZ i 2009/30/EZ u svrhu smanjenja emisije stakleničkih plinova te ispunjavanje obveza Kyotskog protokola i Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama stavlja uporabu energije iz obnovljivih izvora (OI) kao jednu od glavnih provedbenih mjera [1, 2]. Navedena Direktiva svrstava biomasu u obnovljivi nefosilni izvor energije i definira je kao "biorazgradiv dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede (uključujući tvari biljnog i životinjskog podrijetla), šumarstva i s njima povezanih proizvodnih djelatnosti uključujući ribarstvo i akvakulturu te biorazgradiv udio industrijskog i komunalnog otpada" [1].

Godišnje se iz obnovljivih izvora energije (OIE) proizvede 5.469 TWh što čini 23 % svjetske proizvodnje, a biomasa s godišnjom proizvodnjom od 493 TWh je treća na ljestvici OIE u svjetskoj proizvodnji električne energije [3]. Izgaranjem biomase kao nusproizvod nastaje pepeo, i to dvije vrste: pepeo s dna peći i leteći pepeo. Nastali pepeo drvene biomase (PDB) je otpad koji treba deponirati, što predstavlja ekološko i ekonomsko opterećenje, no dosadašnjim istraživanjima je pronađena njegova primjena u poljoprivrednoj i betonskoj industriji. Tek 20 % PDB-a nalazi svoju primjenu u poljoprivredi, 10 % se reciklira na različite načine, a preostali postotak se deponira [4].

Kako je danas jasna veza između klimatoloških promjena i djelovanja čovjeka, propisi u čitavom svijetu postaju sve stroži glede emisije CO₂ te se očekuje trend povećanja dobivanja energije iz OIE kao i obveze smanjenja emisije stakleničkih plinova. Očekivani rast potrošnje biomase za proizvodnju energije do 2050. iznosi i do 7 milijardi tona godišnje što bi na svjetskoj razini moglo generirati do 476 milijuna tona pepela dobivenog izgaranjem biomase [5].

Prema Godišnjem izvještaju Hrvatskog operatora tržišta energije za 2017. godinu, u toj godini sklopljeno je 60 ugovora za otkup električne energije u svrhu izvedbe 114.787 kW snage elektrana na biomasu. Prije 2017. instalirano je 35.950 kW u 17 elektrana na biomasu u svrhu prodaje električne energije [6]. Navedeni podaci odnose se samo na povlaštenu prodaju električne energije te je potencijal još i veći, no ne postoje točni podaci na državnoj razini.

U sklopu istraživačkog projekta TAREC² u dosadašnjim analizama stanja područja o primjeni PDB-a u Hrvatskoj najzastupljenije drvo na ovim područjima je hrast, slijede ga bukva i grab, a analizom kemijskog sastava dominantan je udio kalcijevih oksida.

U procesu proizvodnje cementa, kao glavne komponente betona, velike su energetske potrebe te se kontinuirano teži unaprjeđenju samog tehnološkog procesa,

kao i korištenju energije iz obnovljivih izvora te zamjeni dijela cementa prikladnim materijalima.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da se i do 20 % veziva u betonskoj mješavini može zamijeniti s PDB-om kako bi se postigla zadovoljavajuća mehanička i trajnosna svojstva. Tako se rješava problem deponiranja iz energetske industrije te se smanjuje energetska potreba za proizvodnju cementa u betonskoj industriji, a uz obostrane ekološke koristi i smanjenje emisije CO₂ navedeni proces je i ekonomski povoljniji. Jedina prepreka u provođenju navedenih radnji je ograničavajući faktor sadašnjih normi koje ne dopuštaju uporabu PDB-a u komercijalnoj proizvodnji betona, što se može promijeniti jedino dovoljno opsežnim i jasnim analizama ovog područja (npr. ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete i HRN EN HRN 450-1 Leteći pepeo za beton – 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti).

2 Svojstva pepela drvne biomase (PDB-a)

PDB je heterogena mješavina organskog i anorganskog sastava sastavljena iz raznovrsnog materijala i promjenjivog sastava [7, 8].

2.1 Uzroci varijabilnosti karakteristika PDB-a

Količina i sastav pepela iz drvne biomase (PDB) variraju ovisno o više faktora:

- temperaturi izgaranja drvne biomase
- vrsti biomase, tj. drva (uvjeti rasta, obrade, skladištenja)
- tehnologiji izgaranja, tj. vrsti kotlovske postrojenja [9].

Prema tome su različita svojstva PDB-a posljedica režima izgaranja drvne biomase u peći, kao i vrste i hidrodinamike peći. Kako kemijski sastav i fizikalne karakteristike PDB-a ovise o vrsti drveta, usporen je napredak na ovom području zbog velikih varijacija izvora biomase na različitim zemljopisnim položajima. Naime, izgaranje različitih vrsta biomase uzrokuje varijacije u kemijskom sastavu PDB-a. Ako se kao biomasa koriste npr. šećerna trska i rižine ljuske [8], tada su najviše zastupljeni silicijevi oksidi što znatno utječe i na pucolansku aktivnost PDB-a, dok su kod druge vrste biomase najviše zastupljeni kalcijevi oksidi [7].

O vrsti drvne biomase ovisi i količina pepela koja nastaje u procesu izgaranja. U tablici 1. prikazani su podaci o postotku pepela nastalog izgaranjem različitih vrsta drvne biomase koji su samo dio istraživanja provedenog na većem opsegu biomasa [10].

Tablica 1. Postotak pepela biomase mjereno u suhom uzorku [10]

R.br.	Vrsta drveta	Udio pepela u postotku suhe mase [%]
1	Bor	3,1
2	Eukaliptus 1	4,3
3	Eukaliptus 2	8,1
4	Pluto	4,5
5	Maslinovo drvo	13,3
6	Topola	3,4

Vassilev sa suradnicima [5, 7] pristupio je detaljnoj analizi i sistematizaciji drvene biomase i PDB-a. Pokazali su da je promjenjiva hidraulička aktivnost i inertnost te pucolanska aktivnost posljedica varijabilnih mineraloških sastava te da pepeli mogu biti hidraulički ili puclanski aktivni, ali i potpuno inertni.

Također, kao što je već navedeno, razlikuje se pepeo s dna peći i leteći pepeo. Pepeo s dna peći nastaje u prvoj komori za izgaranje u kotlu i vrlo često sadržava nečistoće a fini se leteći pepeo sakuplja uglavnom s ciklona te s elektrostatičkih i vrećastih filtara koji se u procesu nalaze na poziciji iza kotla [11].

2.2 Kemijska obilježja PDB-a

Općenito, najviše zastupljeni anorganski spojevi u PDB-u su Ca, K, Si, P i Mg, dok udio Ca, Si, K (zastupljeni u PDB-u nastalom izgaranjem drva) te Pb i Zn (teški metali su zastupljeni u PDB-u ako je sirovina otpadno drvo) ovise o vrsti biomase [12]. Kod letećeg pepela nastalog izgaranjem ugljena razlikuju se dvije vrste. Prva je puclanski aktivna s većim udjelom silicija, prema normi ASTM C 618 nazvana klasa F, te prema istoj normi klasa C s većim udjelom CaO i hidrauličkim svojstvima [13]. Slične karakteristike su dosada primijećene i kod letećeg PDB-a koji, ovisno o vrsti, sadržava značajnu količinu silicija te puclanski potencijal ili je, kako tvrdi Vassilev sa suradnicima [5], [7] bogat kalcijevim oksidima, no u ovoj sistematizaciji obuhvaćeni su i leteći pepeli i oni s dna peći. Prosječan sastav oksida PDB-a, prema [4], je:

CaO (43,03 %) > SiO₂ (22,22 %) > K₂O (10,75 %) > MgO (6,07 %) > Al₂O₃ (5,09 %) > P₂O₅ (3,48 %)

Kako je kao vodeći problem u normizaciji ovog materijala te potencijalnoj komercijalnoj upotrebi u cementnoj industriji prije naglašena varijabilnost sastava PDB-a, nadalje je dan uprosječen kemijski sastav PDB-a iz energana na području Republike Hrvatske koji je izrađen u sklopu projekta HRZZ Tarec² [14]:

CaO (47,78 %) > SiO₂ (12,72 %) > K₂O (9,45 %) > MgO (4,90 %) > Al₂O₃ (3,17 %) > P₂O₅ (2,57 %)

te srednje vrijednosti oksida u letećem PDB-u, prema [15] je:

CaO (47,10 %) > SiO_2 (9,02 %) > K_2O (11,15 %) > MgO (4,62 %) > P_2O_5 (2,97 %) > Al_2O_3 (2,59 %)

U više istraživanja pokazana je povećana srednja vrijednost gubitka žarenjem (LOI) [4, 11, 16]. Povećanje postotka LOI upozorava na smanjenu reaktivnost i razvoj čvrstoće.

2.3 Pucolanska aktivnost

Na pucolansku aktivnost upućuje ukupna suma oksida $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Zbog većeg udjela organske tvari, povećani postotak LOI pokazuje na negativan utjecaj na pucolanska svojstva materijala.

PDB nastao izgaranjem rižinih ljuski i šećerne trske bogat je silicijevim oksidima [8]. No takvi i slični izvori biomase nisu dostupni u ovim krajevima, pa se ne mogu očekivati rezultati pucolanske aktivnosti kakvi su dobiveni u studijama sa sličnim uzorcima. O pucolanskoj aktivnosti letećeg PDB-a sličnoj aktivnosti letećem pepelu (LP) od ugljena govore i druga istraživanja kojima je izvor bila biomasa od rižinih ljuski, slame i šećerne trske [13].

Zbog kasnog prirasta čvrstoće (ispitivanja provedena i na uzorcima betona gdje je cement zamijenjen s do 20 % PDB-a) zaključuje se da i pepeli s najvećim udjelom kalcijevih oksida pokazuju slabu pucolansku aktivnost [17].

3 Utjecaj zamjene dijela cementa PDB-om na svojstva građevnih proizvoda

Prema pregledu dosadašnjih istraživanja [7], upotreba PDB-a moguća je u betonu i cementu te pri proizvodnji keramike, vatrootpornih materijala, stakla i premaza, laganog agregata, opeke, blokova, morta i izolacijskih materijala. Nadalje su obrađena svojstva materijala u kojima se PDB koristi kao zamjena dijela cementa u masenom postotku vezivne komponente betonske mješavine ili u mortu.

3.1 Utjecaj PDB-a na svojstva betona u svježem stanju

Zamjenom dijela cementa u betonu s PDB-om povećava se potreba za vodom u odnosu na referentne mješavine u svrhu održavanja obradivosti, što uzrokuje povećani udio CaO u PDB-u [11]. Zbog toga je potrebno koristiti superplastifikatore za ostvarivanje zahtijevanog razreda konzistencije. Tako je u istraživanju [9] pokazano da se za 10 % zamjene mase cementa PDB-om uz primjenu superplastifikatora zadržava obradivost mješavine.

Povećanjem udjela letećeg PDB-a smanjuje se najviša postignuta temperatura oslobođena u procesu hidratacije cementa [9] te je odgođen početak i kraj vremena vezivanja [11]. Zbog toga bi primjenu mogao imati za izradu betona kod kojih se zahtijeva produljeno vrijeme obradivosti te manja toplina hidratacije kao što su masivni betoni.

3.2 Mehanička svojstva cementnih kompozita s PDB-om

PDB dostupan u ovim krajevima ima visok udio kalcijevih oksida [14]. Istraživanje mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti mortova izrađenih s cementom djelomično zamijenjenim PDB-om s velikim udjelom kalcija izradili su Cheah i Ramli [4]. Pokazali su da se normirana tlačna čvrstoća kao i čvrstoća na savijanje smanjuju s povećanjem udjela PDB-a u vezivu, ali se može koristiti do 15 % udjela PDB-a. Prema istraživanjima [11, 14, 16, 18], zamjenom cementa s do 7 % PDB-a s dna peći zadovoljava se razred čvrstoće 42,5 MPa [11], dok se letećim PDB-om može zamijeniti i 20 % portlandskog cementa za ostvarivanje normirane tlačne čvrstoće morta od 42,5 MPa [16]. Utjecaj povećanja udjela PDB-a na smanjenje tlačne čvrstoće potvrđen je u više istraživanja [16], no smatra se da udio do 10 % nema značajan utjecaj na tlačnu čvrstoću betona [18].

3.3 Svojstva trajnosti cementnih kompozita s PDB-om

Propusnost je jedan od glavnih pokazatelja trajnosti betona. Što je propusnost veća, omogućen je veći prodor iona i vlage te je omogućena kemijska erozija materijala [19]. Ispitivanja propusnosti zraka na mortovima pokazala su da dugoročno (ispitivano na uzorcima starim 28 i 90 dana) udio od 5 do 15 % PDB-a povoljno utječe na svojstva trajnosti, a zamjena većeg dijela cementa nakon 28 dana pokazuje veću otpornost, no nakon 90 dana je manje otporna od referentne mješavine izrađene u potpunosti s portlandskim cementom [4]. Nasuprot tome, povećanje električne provodljivosti upućuje na veću poroznost materijala i potencijalno manju otpornost na prodiranje klorida, što može rezultirati smanjenom trajnošću. Povećanjem udjela PDB-a raste i električna provodljivost. [20]

Kad je 10 % PDB-a u masi veziva, smanjuje se ukupno skupljanje (uslijed sušenja i autogeno), što rezultira manjim naprezanjima unutar elementa u konstrukciji [4].

4 Zaključak

Dosadašnja istraživanja u području primjene PDB-a u betonu i cementu pokazuju djelomičnu vezu s letećim pepelom iz termoelektrana na ugljen, no nedostatak normi ograničavajući je faktor njegove komercijalne primjene.

Pokazana je jasna potreba za održivijim postupanjem s pepelom te njegovom mo-

gućom primjenom u cementnim kompozitima. No ovo područje zahtijeva opsežnija istraživanja u vidu karakterizacije i sistematizacije PDB-a, a potom i njegovih svojstva te utjecaja na svojstva u svježem stanju te mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona. Najveće razlike uočene su između pepela različitih biomasa te između pepela s dna peći i letećeg pepela.

Ovisno o vrsti PDB-a i ispitanim svojstvima, preporučeni je udio za zamjenu cementa od 5 do 20 % te bi u tom rasponu trebalo nastaviti s daljnjim ispitivanjima.

Kako se radi o heterogenoj tvari vrlo složenog procesa nastajanja i varijabilnog sastava, potrebno je ustanoviti jasnu kontrolu procesa i kvalitete od sirovine (biomase), procesa izgaranja, skupljanja, prijevoza i skladištenja, kao i potencijalnu obradu prije uporabe u građevnim proizvodima.

Potencijal primjene PDB-a u betonskoj industriji interes je i energetske i građevinske grane te predstavlja izazov za rješavanje dvostrukog problema. Potreba za daljnjim istraživanjima naročito je naglašena svjetskim trendovima i sve većim brojem energana na biomasu kao i strožim propisanim okvirima koji su posljedica potrebe za smanjenjem emisije CO₂.

Zahvala

Istraživanja prikazana u ovom radu provedena su u okviru znanstvenog projekta IP-2016-06-7701 *Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC²*, koji financira Hrvatska zaklada za znanost.

Literatura

- [1] Europski parlament i vijeće Europske unije, Direktiva 2009/28/EZ Europskoga parlamenta i Vijeća od 23. travnja 2009. o poticanju uporabe energije iz obnovljivih izvora te o izmjenama i dopunama i budućemu ukidanju Direktiva 2001/77/EZ i 2003/30/EZ, 2009.
- [2] Ujedinjeni narodi, Okvirna konvencija UN-a o klimatskim promjenama, 1992.
- [3] WBA, WBA Global Bioenergy Statistics 2014., www.worldbioenergy.org
- [4] Cheah, C.B., Ramli, M.: Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement, *Construction and Building Materials*, 30 (2012), pp. 320–329.
- [5] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G.: An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification, *Fuel*, 105 (2013), pp. 40–76.
- [6] HROTE: Sustav poticanja OIEIK u RH - godišnji izvještaj za 2017. godinu, www.hrote.hr

- [7] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G.: An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges, *Fuel*, 105 (2013), pp. 19–39.
- [8] Chaunsali, P. et al.: Mineralogical and microstructural characterization of biomass ash binder, *Cement and Concrete Composites*, 89 (2018), pp. 41–51.
- [9] Ban, C.C., Ramli, M.: Resources Conservation and Recycling The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar : An overview, *Resources, Conservation & Recycling*, 55 (2011) 7, pp. 669–685.
- [10] Llorente, M.J.F., García, J.E.C.: Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion, *Fuel*, 84 (2005) 14–15, pp. 1893–1900.
- [11] Sklivaniti, V. i ostali: Valorisation of Woody Biomass Bottom Ash in Portland Cement: A Characterization and Hydration Study, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5 (2017) 1, pp. 205-213
- [12] Van Loo, S., Koppejan, J.: *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, London NW1 0JH, UK: Earthscan, 2008.
- [13] Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F., Baxter, L.: Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties, *Fuel*, 87 (2008) 3, pp. 365–371.
- [14] HRZZ: Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vriednošću, 2016.
- [15] Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N., Ukrainczyk, N.: Karakterizacija pepela iz drvene biomase (PDB-a), Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2018.
- [16] Tosti, L., van Zomeren, A., Pels, J.R., Comans, R.N.J.: Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material, *Resources, Conservation and Recycling*, 134 (2018), pp. 25–33.
- [17] Udoeyo, F.F., Inyang, H., Young, D.T., Oparadu, E.E.: Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (2006), pp. 605–611.
- [18] Velay-Lizancos, M., Azenha, M., Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P.: Addition of biomass ash in concrete: Effects on E-Modulus, electrical conductivity at early ages and their correlation, *Construction and Building Materials*, 157 (2017), pp. 1126–1132.
- [19] Wang, S., Llamazos, E., Baxter, L., Fonseca, F.: Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests, *Fuel*, 87 (2008) 3, pp. 359–364.
- [20] Ban, C.C., Nordin, N.S.A., Ken, P.W., Ramli, M., Hoe, K.W.: The high volume reuse of hybrid biomass ash as a primary binder in cementless mortar block, *American Journal of Applied Sciences*, 11 (2014.) 8, pp. 1369–1378.

Analiza ponašanja armiranobetonske zgrade u potresu

Filip Cvetko¹, doc.dr.sc. Mario Uroš², izv.prof.dr.sc. Domagoj Damjanović³

¹ Radionica statike d.o.o., filip.cvetko@statika.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku, uros@grad.hr

³ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku, ddomagoj@grad.hr

Sažetak

Dinamički parametri građevine – vlastite frekvencije, modalni oblici i koeficijenti prigušenja, osnovni su pokazatelji realnog stanja građevine i omogućuju predviđanje ponašanja konstrukcije uslijed mogućeg potresnog opterećenja. Provedena su eksperimentalna mjerenja dinamičkih parametara zgrade Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno – matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Izrađen je numerički model građevine i provedena je kalibracija modela na temelju rezultata ispitivanja te je analizirano ponašanje armiranobetonske konstrukcije uslijed potresnog opterećenja.

Ključne riječi: dinamički parametri, eksperimentalno mjerenje, numeričko modeliranje, kalibracija, potres

Analysis of reinforced concrete building under seismic load

Abstract

Dynamic structural parameters - natural frequencies, modal shapes, and damping coefficients - are the basic indicators of the real building condition, and they allow prediction of building behaviour under seismic load. Experimental measurements of dynamical parameters were conducted for the Geophysical Department building forming part of the Faculty of Science of the University of Zagreb. Numerical model of the building was made and the model was calibrated based on experimental results. Finally, the behaviour of the reinforced concrete structure subjected to seismic load was analysed.

Key words: dynamic parameters, experimental testing, numerical modelling, calibration, earthquake

1 Uvod

U protekla dva desetljeća postala je operacionalna modalna analiza glavni postupak utvrđivanja dinamičkih karakteristika građevinskih konstrukcija. Modalnom analizom određuju se dinamički parametri, odnosno vlastite frekvencije, modalni oblici i prigušenja konstrukcije prilikom određene pobude. Važna je zbog konačnog formuliranja matematičkog modela i upotrebljava se pri opisivanju cjelokupnog dinamičkog ponašanja konstrukcije [1].

Potresno opterećenje je dominantno horizontalno opterećenje na građevinske konstrukcije u našem području. Dinamički parametri građevine osnovni su pokazatelji realnog stanja građevine i omogućuju predviđanje ponašanja građevine uslijed mogućeg potresnog opterećenja [2]. Provedeno je eksperimentalno mjerenje dinamičkih parametara postojeće građevine i na temelju tih rezultata i dostupnih materijala izrađen je i kalibriran numerički model konstrukcije. Provedena je potresna analiza i dana ocjena konstrukcije u odnosu na današnje propise. Dostupni materijali uključivali su originalne arhitektonske podloge i armaturne nacрте građevine.

Numerička analiza provedena je metodom konačnih elemenata, najčešće primjenjivanom numeričkom metodom u inženjerskoj praksi.

2 Opis predmetne građevine

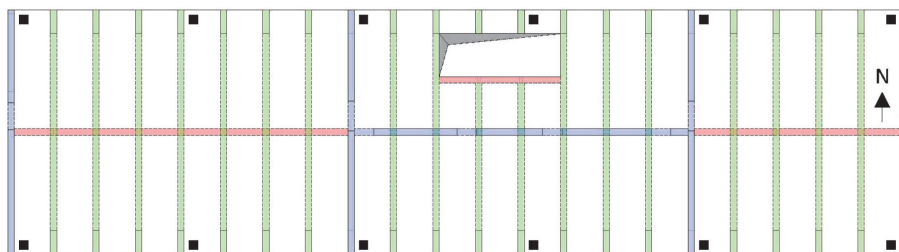
Zgrada Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno – matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu sagrađena je 1982. godine. Prvotno je imala tri etaže, a zadnja četvrta etaža nadograđena je 1996. godine. Građevina je pravokutnog tlocrtnog oblika, približnih dimenzija $45,50 \times 12,40$ m. Visina zgrade, uključujući i četvrtu etažu, iznosi 14,95 m. Četvrta etaža ne pridonosi krutosti konstrukcije već samo predstavlja dodatno stalno opterećenje na glavnu nosivu konstrukciju ispod. Nosivu konstrukciju u poprečnom smjeru čine armiranobetonski okviri na razmaku od $e = 2,16$ m i četiri armiranobetonska zida debljine 16 cm. Odnos stranica vertikalnog nosivog elementa iznosi 1:7,5 tako da se on može smatrati zidom, tj. lamelom.



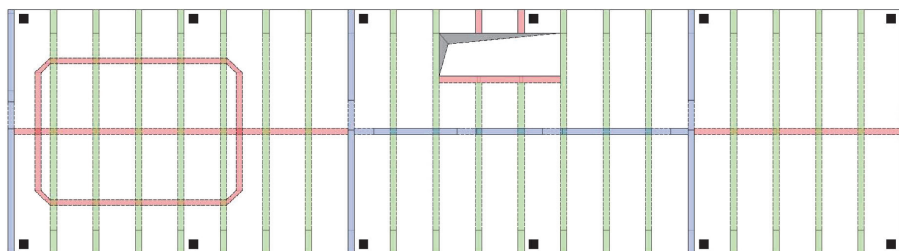
Slika 1. Sjeverno pročelje (lijevo) i južno pročelje (desno) zgrade Geofizičkog odsjeka PMF-a na Horvatuvcu 95

Lamela AB okvira dimenzija je $b/h = 16/120$ cm, a greda okvira je dimenzija $b/h = 16/60$ cm. Nosivu konstrukciju u uzdužnom smjeru čini jedan središnji armiranobetonski zid debljine 16 cm. Marka betona je prema dostupnim nacrtima armature MB 30, što odgovara današnjem razredu betona C25/30. Četvrta naknadno nadograđena etaža je zidana konstrukcija. Zidani zidovi su debljine 30 cm. Krovište je drveno dvostrešno blagog nagiba. Temeljnu konstrukciju čine temeljne stope ispod okvira i temeljne trake ispod nosivih zidova. Na slici 2. shematski su prikazani vertikalni nosivi elementi konstrukcije.

1. i 2. KAT

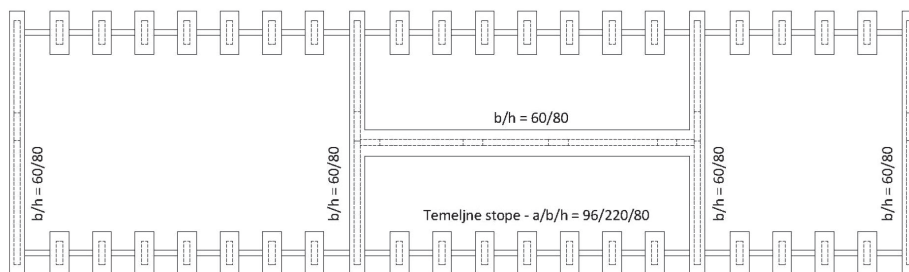


PRIZEMLJE



■ AB zidovi debljine $t = 16$ cm
 ■ AB okviri - lamela $b/h = 16/120$ cm i grede $b/h = 16/60$ cm
 ■ AB grede $b/h = 16/60$ cm
■ mjerna mjesta

TEMELJI



Slika 2. Shematski prikaz nosive konstrukcije predmetne građevine

Prilikom ispitivanja, proveden je i vizualni pregled nosive konstrukcije predmetne građevine. Prema dostupnim informacijama, na zapadnoj strani građevine tlo je lošije kvalitete [2]. Na toj strani smještena je potpuno dilatirana konstrukcija vanjskog stubišta i vidljiv je razmak između stubišta i građevine koji se povećava s visinom (oko 1 cm na prvoj etaži do 2 – 2,5 cm na zadnjoj etaži), što je posljedica diferencijalnih slijeganja građevine. Na sjevernoj i južnoj fasadi su uočene pravilno raspoređene vertikalne pukotine koje su najvjerojatnije posljedica temperaturnih naprezanja i nepostojanja dilatacijskih reški u konstrukciji.

Također, uočene su razne pukotine u pregradnim zidovima, kojih ima više na zapadnoj strani. Na glavnim nosivim elementima konstrukcije, lamelama i gredama te nosivim zidovima, nisu uočene nikakve pukotine ili oštećenja koja bi upozoravala na nedostatnu nosivost konstrukcije.

3 Eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara

Eksperimentalno istraživanje je provedeno s ciljem određivanja osnovnih dinamičkih parametara konstrukcije – vlastitih oblika, frekvencija i koeficijenta prigušenja koji će kasnije poslužiti za kalibraciju numeričkog modela konstrukcije. Eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara provedeno je operacionalnom modalnom analizom (OMA).

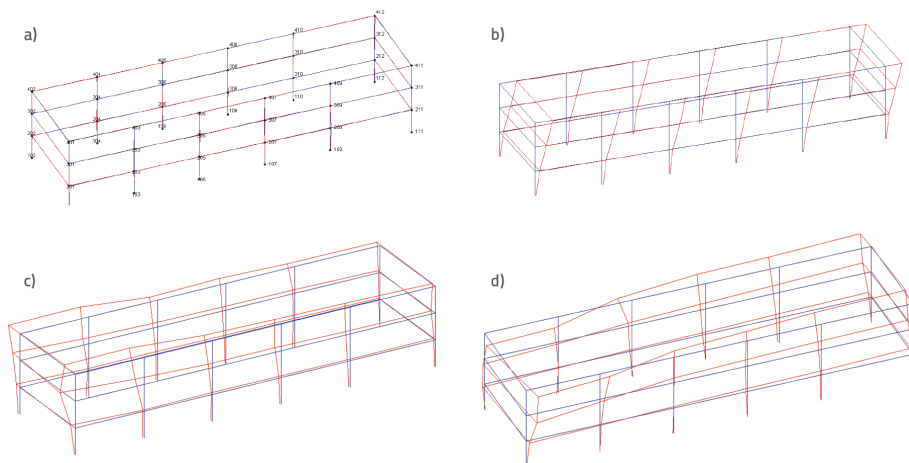
Operacionalna modalna analiza počela se koristiti 90-ih godina prošlog stoljeća. OMA omogućuje određivanje dinamičkih parametara konstrukcije mjerenjem ambijentalnih vibracija konstrukcije. Općenito, OMA je našla široku primjenu kod dinamičkih ispitivanja građevinskih konstrukcija zbog niza prednosti. Najvažnije prednosti odnose se na to što se koriste samo rezultati izmjerenih odgovora konstrukcije, a to znači da nije potrebno poznavati ulaznu pobudu, i to što pri ispitivanju nije potrebno kontrolirano pobuđivati konstrukciju, već se umjesto kontrolirane funkcije pobude koristi ambijentalna pobuda u operacionalnim uvjetima. Pri tome pretpostavljamo da je ona stohastičkog, odnosno nasumičnog karaktera. Osim toga, provođenje ispitivanja zahtijeva samo korištenje opreme za prikupljanje i obradu podataka što omogućuje jednostavnije, brže i jeftinije provođenje ispitivanja [3]. Odgovor konstrukcije (pomak, brzina, akceleracija, vibracije) maksimalne vrijednosti poprima pri određenim frekvencijama te se Fourierovom transformacijom, odnosno razlaganjem signala na komponente s određenim frekvencijama, transformira odgovor konstrukcije iz vremenske u frekvencijsku domenu. Na mjestima rezonantnih frekvencija u frekvencijskom zapisu ističu se rezonantni vrhovi, a iz pripadnih amplituda možemo odrediti modalne oblike [3].

Za zgradu Geofizičkog odsjeka odabrano je 48 karakterističnih točaka mjerenja čiji je položaj prikazan na slici 2. Korištena oprema uključivala je četiri akcelerometra, sustav za prikupljanje podataka i sustav za analizu podataka. Mjerenjem ambijen-

talnih vibracija dekompozicijom frekvencijskog područja (eng. *Frequency Domain Decomposition* - FDD) i poboljšanom dekompozicijom frekvencijskog područja (eng. *Enhanced Frequency Domain Decomposition* - EFDD) metodom OMA-e određeni su dinamički parametri konstrukcije. EFDD metoda nam omogućuje procjenu koeficijenta prigušenja, koji se ne može odrediti standardnom FDD metodom. Odgovor konstrukcije mjereno je pomicanjem dva akcelerometra kroz svih 48 točaka uz dva nepomična referentna akcelerometra, po jedan za svaki horizontalni smjer. Vibracije su mjerene na rubovima objekta u blizini lamela poprečnih AB okvira s 12 mjernih točaka po stropnoj ploči. Mjerenja su izvršena u prizemlju, 1., 2. i 3. katu. Vibracije su mjerene u dva glavna horizontalna smjera, što sveukupno daje 96 mjerenih stupnjeva slobode. Rezultati ispitivanja dinamičkih parametara prikazani su u tablici 1. Prikaz mjernih i modalnih oblika dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem dan je na slici 3.

Tablica 1. Rezultati eksperimentalnog mjerenja

Modalni oblik	Frekvencija [Hz]	Prigušenje [%]	Period [s]
1. translacija X	4,25	3,95	0,235
2. translacija Y	5,50	5,43	0,182
3. torzija	6,40	5,68	0,156

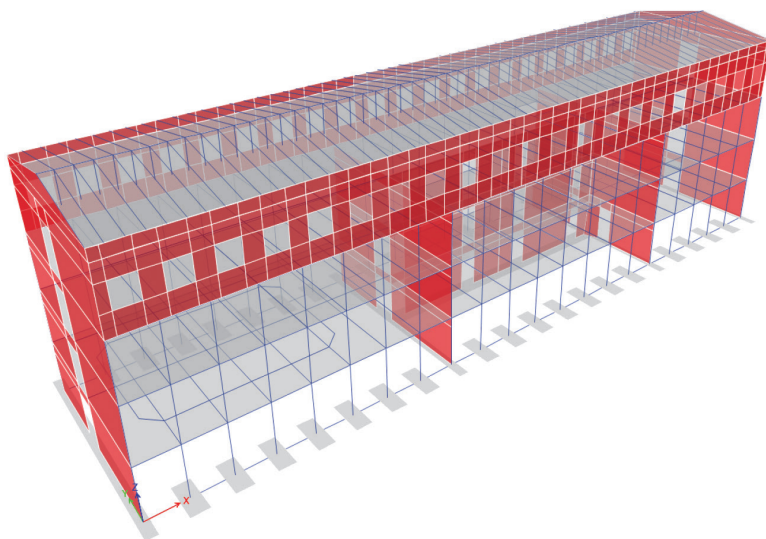


Slika 3. Prikaz mjernih i modalnih oblika dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem: a) Mjerna mjesta; b) Prvi modalni oblik – translacija u uzdužnom smjeru – $f = 4,25$ Hz; c) Drugi modalni oblik – translacija u poprečnom smjeru – $f = 5,50$ Hz; d) Treći modalni oblik – torzija – $f = 6,40$ Hz

Pregledom oblika osciliranja i dobivenih vrijednosti frekvencije, tj. perioda za prvi ton, možemo zaključiti da su rezultati ispitivanja valjani. Empirijski izraz prema normi HRN EN 1998-1, t.4.3.3.2.2 [4], daje sličnu približnu vrijednosti perioda ($T_1 = 0,270$ s) za zgradu te visine. U drugom i trećem modalnom obliku primjećuje se manja nepravilnost u obliku osciliranja, što odgovara činjenici da na toj zapadnoj strani građevine postoji dosta pukotina koje upućuju da je tu konstrukcija na neki način oštećena. Također, upravo na tom dijelu je tlo lošije kvalitete [2], što je moglo rezultirati oštećenjem nosive konstrukcije uslijed neravnomjernih slijeganja. Rezultati eksperimentalnog mjerenja iskorišteni su za kalibraciju numeričkog modela konstrukcije.

4 Numerički model konstrukcije

Numerička analiza provedena je metodom konačnih elemenata. Proveden je proračun vlastitih perioda i oblika konstrukcije te statički linearni proračun. Numerički model konstrukcije napravljen je u programskom paketu ETABS 2015. U modelu je upisana cjelokupna armiranobetonska nosiva konstrukcija u skladu s geometrijom i mehaničkim svojstvima materijala. Beton je razreda C25/30, a kasnije dimenzioniranje kritičnih elemenata je provedeno za armaturu od rebrastih šipki i mreža kvalitete B 500B(A). AB zidovi i ploče modelirani su plošnim konačnim elementima ljuske sa šest stupnjeva slobode po čvoru. Prilikom očitavanja rezultata u zidovima korišten je zamjenski štapni element pridružen plošnom konačnom elementu. Sve ploče su modelirane kao krute dijafragme. Poprečne AB lamele i grede modelirane su linijskim konačnim elementima Timošenkove grede gdje se u obzir uzimaju i posmična naprezanja. Na spojevima AB lamela i grede korištena su kinematička ograničenja, tj. spoj je modeliran kao apsolutna kruta veza. Numerička analiza provedena je bez smanjenja krutosti plošnih i linijskih elemenata. Temelji su modelirani plošnim konačnim elementima odgovarajuće debljine, a tlo ispod modelirano je popustljivim plošnim osloncem (Winklerov model). Konačni elementi definirali su maksimalne veličine $0,4 \times 0,4$ m. Četvrta etaža modelirana je samo kao dodatno opterećenje te se nije posebno analizirala. Dodatno stalno opterećenje procijenjeno je na $1,00$ kN/m², a uporabno opterećenje uzeto je u iznosu od $2,00$ kN/m². Na slici 4. prikazan je 3D model konstrukcije s upisanim svim elementima konstrukcije.



Slika 4. Prikaz 3D modela konstrukcije

Numeričkim proračunom dobiveni su isti vlastiti oblici kao i ispitivanjem – prvi ton uzdužna translacija, drugi ton poprečna translacija i treći ton torzija. Kako bi se dobio što točnije vrijednosti frekvencija, tijekom kalibracije modela mijenjana je krutost tla. Iterativnim postupkom, počevši od apsolutno krutog tla, gdje su dobivena velika odstupanja u odnosu na mjerenja (20-50 %), konačna krutost tla uzeta je u iznosu $k = 200\,000\text{ kN/m}^3$ jer se pokazala da daje najbliže vrijednosti frekvencija u odnosu na provedeno ispitivanje.

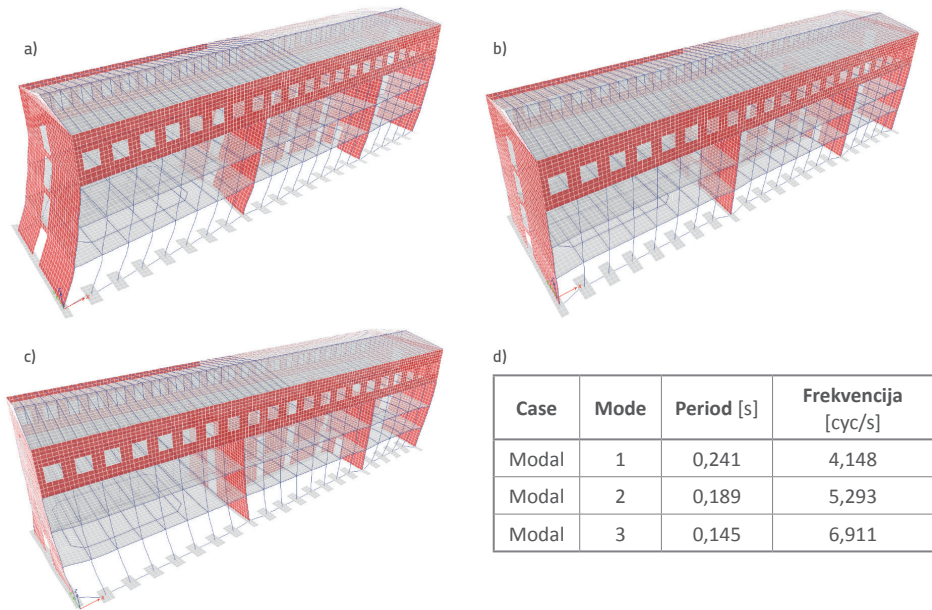
Veliki koeficijent tla tipičan je za ambijentalne vibracije jer je tlo jako kruto u odnosu na konstrukciju i ponaša se linearno elastično. Utjecaj krutosti tla na dobivene frekvencije te usporedba s eksperimentalnim mjerenjem prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Usporedba rezultata ispitivanja s rezultatima numeričkih modela s različitim krutostima tla

Modalni oblik	Eksperimentalno		Numerički model $k = 200\,000\text{ kN/m}^3$			Numerički model $k = 150\,000\text{ kN/m}^3$			Numerički model $k = 100\,000\text{ kN/m}^3$		
	f [Hz]	T [s]	f [Hz]	T [s]	R [%]	f [Hz]	T [s]	R [%]	f [Hz]	T [s]	R [%]
1. translacija X	4,25	0,235	4,15	0,241	2,55	4,05	0,252	7,23	3,37	0,271	15,31
2. translacija Y	5,50	0,182	5,29	0,189	3,84	5,06	0,204	12,08	4,35	0,230	26,92
3. torzija	6,40	0,156	6,91	0,145	7,05	6,67	0,150	3,84	6,17	0,162	3,85

Iz tablice 2. vidljivo je da manje krutosti tla daju bližu vrijednost frekvencije za treći torzijski ton, ali puno veće odstupanje za prva dva translacijska tona. Stoga je oda-

brana krutost tla $k = 200\,000 \text{ kN/m}^3$ gdje se frekvencije za prva dva translacijska tona izvrsno poklapaju s onim dobivenim ispitivanjem, a dobiva se nešto veće odstupanje za treći torzijski ton. Budući da je to odstupanje samo 7 %, možemo zaključiti da je numerički model ispravan i da dobro aproksimira realno ponašanje konstrukcije. Na slici 5. prikazani su rezultati modalne analize na numeričkom modelu.



Slika 5. Rezultati modalne analize na numeričkom modelu: a) Prvi modalni oblik – translacija u uzdužnom smjeru – $f = 4,15 \text{ Hz}$; b) Drugi modalni oblik – translacija u poprečnom smjeru – $f = 5,29 \text{ Hz}$; c) Treći modalni oblik – torzija – $f = 6,91 \text{ Hz}$; d) Tablični prikaz rezultata modalne analize iz ETABS-a

5 Proračun na potresno djelovanje

Proračun seizmičkog djelovanja provodi se prema normama HRN EN 1998-1:2011 i HRN EN 1998-1:2011/NA:2011. Predmetna građevina je trećerazredne važnosti. Horizontalno vršno ubrzanje tla na lokaciji građevine iznosi $a_{gR}/g = 0,259$ ($T_p = 475 \text{ g.}$), $a_{gR}/g = 0,129$ ($T_p = 95 \text{ g.}$). Faktor ponašanja pretpostavlja se u iznosu $q = 2,5$. Tlo se uzima kao tlo kategorije C. Proveden je seizmički proračun i dimenzioniran je najkritičniji AB okvir. Potrebna armatura uspoređena je s ugrađenom armaturom prema dostupnim armaturnim nacrtima. Sve AB lamele i AB grede armirane su jednako. Uspoređuje se armatura lamela i armatura grede u gornjoj zoni na spoju sa stupom, što je najkritičniji presjek (tablica 3.).

Tablica 3. Usporedba potrebne armature prema važećim propisima i ugrađene armature

Konstruktivski element	Ugrađena armatura [cm ²]		Potrebna armatura [cm ²]
AB lamela 16/100 cm	2×2Φ16 + 2×R-251	14,06	14,02
AB greda 16/60 cm	5Φ19+2Φ16	11,33	10,05

Iz tablice 3. možemo zaključiti da su promatrani AB elementi armirani u skladu s potrebnom armaturom prema proračunu. Također, provjereni su horizontalni pomaci konstrukcije koji iznose ukupno oko 5 mm za poprečni smjer i oko 7 mm za horizontalni smjer, što je ispod dopuštene maksimalne vrijednosti horizontalnog pomaka. Prema normi HRN EN 1998-1:2011, pri djelovanju seizmičkih sila potrebno je zadovoljiti duktilnost presjeka. Za razred duktilnosti M uzdužna tlačna sila u zidu mora biti manja od $N_{Ed} = 0,40 \times f_{cd} \times A$. U ovom slučaju, dopuštena tlačna sila u lameli iznosi $N_{Ed} = 1282$ kN. Maksimalna očitana tlačna sila iz numeričkog modela iznosi $N_{Rd} = 564$ kN, čime je uvjet zadovoljen. Razina tlačne sile je zadovoljena u svim presjecima.

6 Zaključak

Ovim radom prikazan je postupak određivanja dinamičkih parametara postojeće građevine primjenom eksperimentalnih mjerenja te izrada numeričkog modela konstrukcije koji je kalibriran na temelju eksperimentalnih rezultata. Eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara posve je nerazorno, a primjenom metoda OMA-e kod kojih nije potrebno kontrolirano nanositi pobudu na konstrukciju, postupak se dodatno pojednostavljuje, ubrzava i pojeftinjuje. Prednost ovog pristupa je to što je pomoću rezultata eksperimentalnih mjerenja moguće kalibrirati numerički model konstrukcije kako bi se rezultati numeričkog modela približili stvarnom ponašanju postojeće konstrukcije bez provođenja opsežnih i skupih istražnih radova. Takav model je pogodan za daljnju analizu konstrukcije te ga je moguće primijeniti u analizi stvarnog ponašanja konstrukcije izložene seizmičkom opterećenju. Seizmički proračun konstrukcije izuzetno je značajan radi utvrđivanja njezine dostatne mehaničke otpornosti i stabilnosti, pogotovo kod starih zgrada koje su građene u vrijeme nekadašnjih propisa. Proračunom je pokazano da je dinamičko ponašanje predmetne konstrukcije pravilno i da ima dostatnu horizontalnu krutost.

Literatura

- [1] Chopra, A.: Dynamics of structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering, University of California at Berkeley, Third Edition, 2007.
- [2] Herak, M., Herak, D.: Continuous monitoring of dynamic parameters of DGFSM building (Zagreb, Croatia), Bull Earthquake Eng, (2010) 8, pp. 657-669.
- [3] Damjanović, D.: Ispitivanje konstrukcija. Skripta za diplomski studij, Sveučilište u Zagreb, Građevinski fakultet, Zagreb, 2018. (link za preuzimanje: http://www.grad.unizg.hr/_download/repository/SKRIPTA_IK_DD.pdf)
- [4] Eurokod 8: HRN EN 1998-1: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009) + nacionalni dodatak

Sidrenje tkaninom armiranih mortova (TRM) i vlaknima armiranih polimera (FRP) pri pojačavanju armiranobetonskih i zidanih elemenata konstrukcija

Robert Lušo¹, prof.dr.sc. Tomislav Kišiček²

¹ Mi Projektiramo Vama d.o.o., robert@mpv.hr

² Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, kisha@grad.hr

Sažetak

Posljednjih se godina pri pojačavanju postojećih armiranobetonskih i zidanih konstrukcija primjenjuju mnoge metode pojačavanja među kojima su se istaknule one u kojima se koriste vlaknima armirani polimeri (FRP) i tkaninom armirani mortovi (TRM). Uz znatan učinak koji su pokazali ti materijali, naglasak je uglavnom na njihovim prednostima u odnosu na tradicionalne metode pojačavanja konstrukcija, međutim manje pozornosti je posvećeno načinima sidrenja FRP-a i TRM-a. Kako bi se osigurala odgovarajuća nosivost i u konačnici kvalitetnije mogle upotrijebiti navedene tehnike pojačavanja konstrukcija, potrebno je kvalitetno rješenje sidrenja kod FRP-a i TRM-a. U ovom radu pokazuju se načini sidrenja kod FRP-a i TRM-a prilikom pojačavanja armiranobetonskih i zidanih elemenata.

Ključne riječi: TRM, FRP, sidrenje, pojačavanje

Anchoring textile reinforced mortars (TRM) and fibre reinforced polymers (FRP) during strengthening of reinforced concrete and masonry structures

Abstract

Among many methods that have been used in recent years for retrofitting existing RC and masonry structures, a particular place is taken by those involving the use of fibre reinforced polymers (FRP) and textile reinforced mortars (TRM). With regard to significant performance demonstrated by these materials, the emphasis is mostly placed on their advantages compared to traditional strengthening methods, while less attention is paid to the FRP and TRM anchoring methods. To ensure proper bearing capacity and ultimately better use of these structure strengthening techniques, a quality anchorage solution is required for FRP and TRM. Anchoring methods used for FRP and TRM during strengthening of reinforced-concrete and masonry elements are presented in the paper.

Key words: TRM, FRP, anchoring, strengthening

1 Uvod

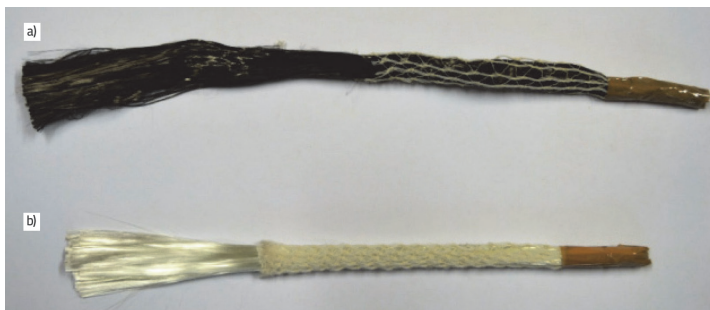
Upotreba vlaknima armiranih polimera (FRP) kao materijala za pojačavanje armiranobetonskih i zidanih elemenata, radi njihovih povoljnih svojstava (mala težina, visoka čvrstoća, otpornost na koroziju), sve se više povećava. Da bi se izbjegla neka nepovoljna svojstva koja su povezana s epoksidnim smolama, istraživači su kod postavljanja FRP-a predstavili novi koncept spajanja naprednih vlakana u obliku tekstila s anorganskom matricom, kao što su mortovi na bazi cementa. Naziv novog materijala proizlazi iz njegovih komponenti; tkaninom armirani mortovi ili TRM (eng. *textile reinforced mortars*). TRM je izuzetno obećavajuće rješenje u mnogim slučajevima kao što su pojačavanje postojećih armiranobetonskih i zidanih konstrukcija u uvjetima velike seizmičnosti, upotreba kod elemenata izloženih visokim temperaturama (bitna prednost u odnosu na FRP), kod elemenata gdje se ne može kvalitetno ugraditi FRP zbog ograničavajućih uvjeta okoline i površine na koje se primjenjuje (hladne i vlažne površine) [1].

Oba načina ojačavanja (FRP i TRM) uspješno se upotrebljavaju pri pojačavanju na savijanje i posmik armiranobetonskih elemenata, međutim preuranjeno odvajanje FRP ili TRM traka ili mreža s betonske površine ograničavaju ove tehnike. Kako bi se taj problem odvajanja spriječio ili ublažio, potrebno je omogućiti dostatno sidrenje FRP-a ili TRM-a. Postoji više načina sidrenja pri pojačavanju s kompozitnim materijalima, od kojih će se nekoliko opisati u ovom radu.

2 Metode sidrenja

2.1 Sidrenje pomoću tzv. lepezastih sidara (FRP spike anchors)

Sustavi sidrenja uključuju upotrebu čeličnih lepezastih sidara ili sidara izrađenih od FRP-a. Sidrenje čeličnim lepezastim sidrima (ova sidra su ista kao i lepezasta sidra od ugljika, samo su s čeličnim žicama) već su istraživali neki autori kao u [2]. Unatoč učinku čeličnih lepezastih sidara, takvo sidrenje ima određene nedostatke: velika težina, nekompatibilnost s kompozitnim materijalima i potreba za posebnom antikorozivnom zaštitom. Sidra izrađena od FRP-a su otporna na koroziju te se mogu upotrijebiti kod pojačanja greda, ploča, stupova, okvira i zidova. FRP sidra su izrađena od snopa ugljičnih, staklenih ili aramidnih vlakana, kod kojih se razlikuju dva dijela, prvi sidreni i drugi lepezasti. Sidra od ugljičnih i staklenih vlakana prikazana su na slici 1. Sidreni dio je preimpregnirani namotani dio u obliku šipke koji se sidri u odgovarajuće pripremljeni otvor u elementu. Lepezasti dio sidra se impregnira na mjestu ugradnje i preraspodijeli u obliku lepeze preko FRP traka ili TRM mreža, što možemo vidjeti na slici 2.

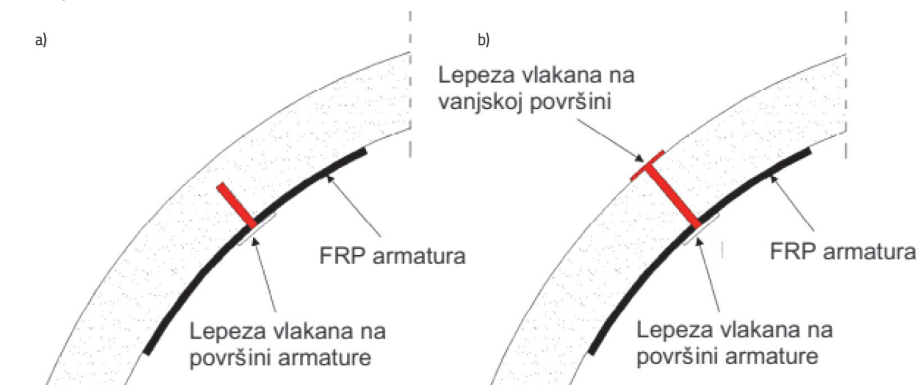


Slika 1. FRP sidra s lepezastim završetkom: a) od ugljičnih vlakana; b) od staklenih vlakana (dolje) [3]

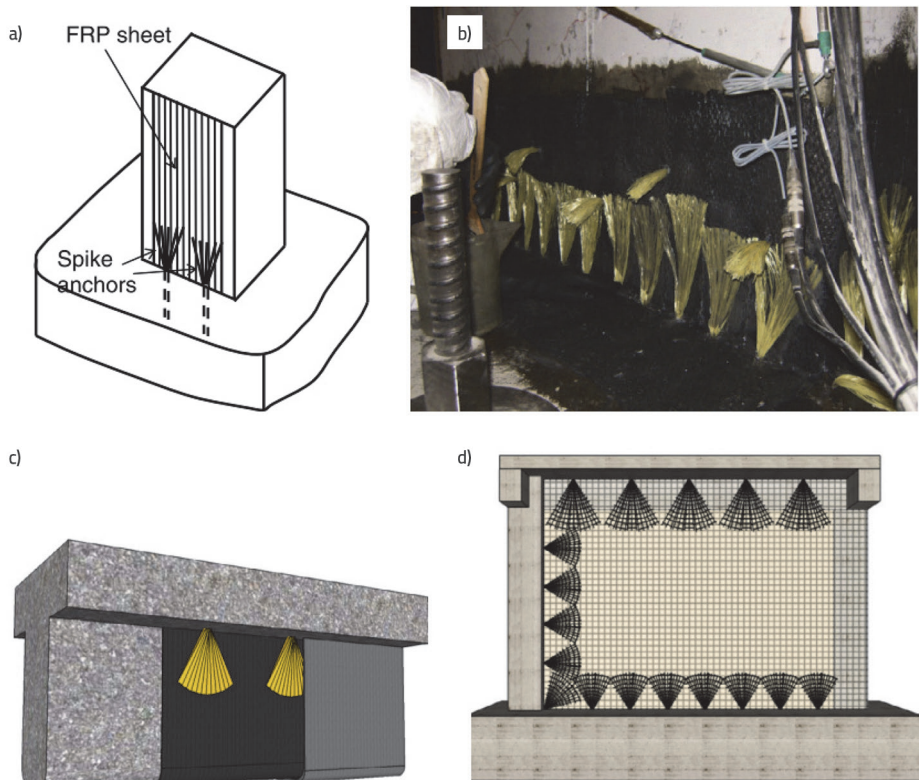


Slika 2. Pripremanje uzorka za ugljično sidro: a) impregnacija sidra; b) ugradnja ravnog dijela sidra; c) preraspodjela vlakana po uzorku

Osnovni način sidrenja FRP sidra prikazan je na slici 3.a, dok se u nekim slučajevima sidrenje provodi tako da se sidro izradi s lepezastim završetkom na oba kraja. Sidrenje takvim sidrom je prikazano na slici 3.b, postavljanje kroz element sa rasprostiranjem lepeze i sa suprotne strane ojačanja. Na slici 4. su prikazani navedeni oblici sidrenja FRP i TRM mreža sidrima od FRP-a [1].

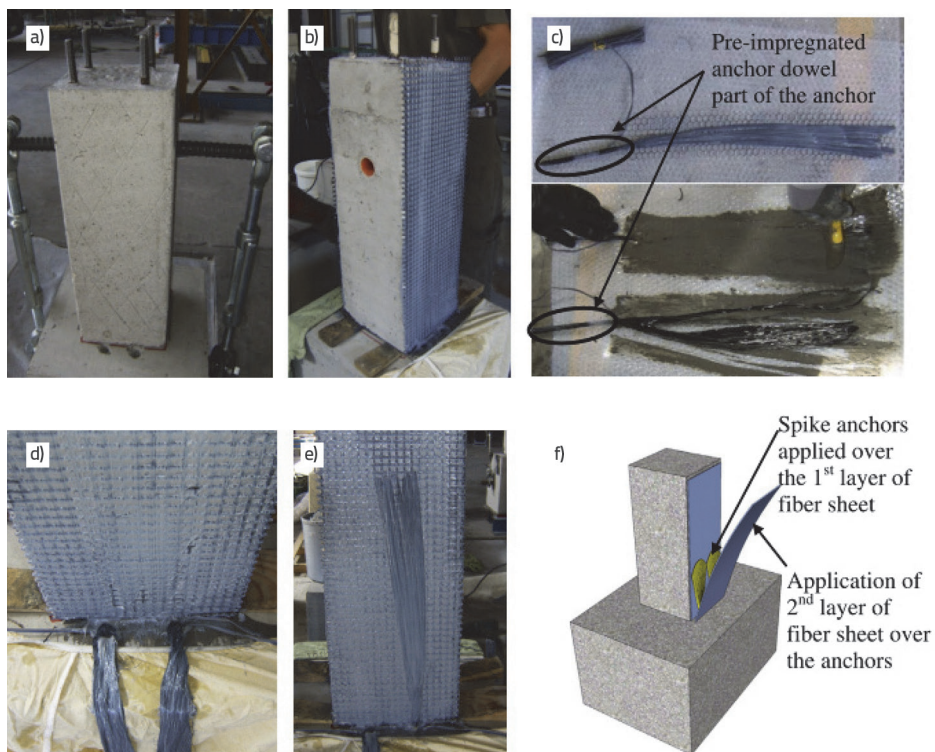


Slika 3. Načini korištenja sidara s lepezastim završetkom: a) sidrenje u otvor; b) sidrenje kroz element [3]

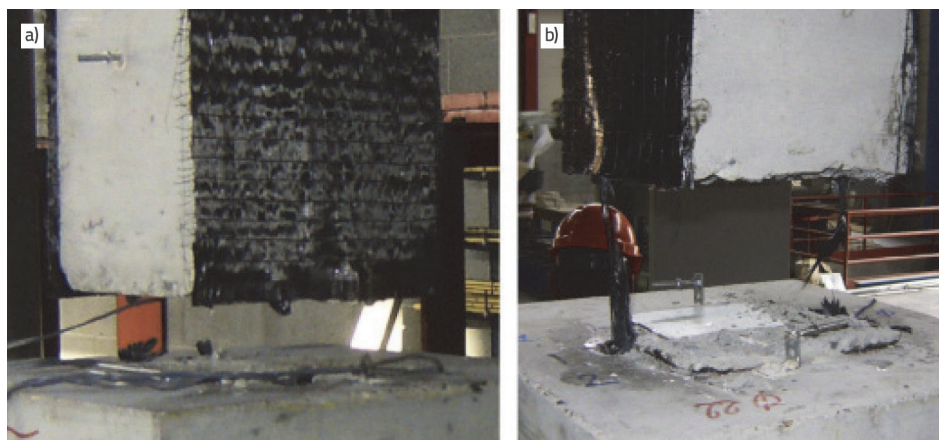


Slika 4. Primjeri postavljanja FRP sidra s lepezastim krajem: a) pojačanje armiranobetonskog stupa na savijanje lijepljenim FRP platnima (FRP sheet) u kombinaciji s FRP sidrima (Spike anchors), b) pojačanje na savijanje stupa mosta karbonskim platnima i FRP sidrima od aramidnih vlakana, c) FRP sidra kod pojačanja na posmik T-grede ovijenog hrpta, d) pojačanje armiranobetonskih okvira TRM mrežama i sidrima na bazi tekstilnih vlakana

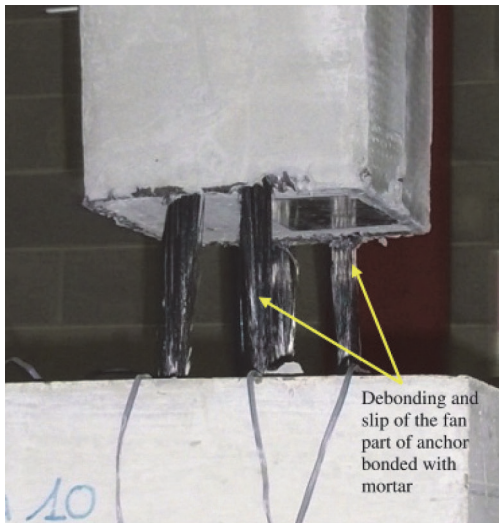
Istraživanje na FRP sidrima s lepezastim završetkom provelo je samo nekoliko autora: Ozdemir i Akyuz [3], Ozbakkaloglu i Saatcioglu [8], Kim i Smith [9]. Ozdemir i Akyuz provjeravali su vlačnu čvrstoću anкера ugrađenih u beton uz određene parametre (dubina sidrenja, veličina rupe u koju se sidri, količina sidrenih vlakana, tlačna čvrstoća betona). Zaključili su da je iznimno značajna dubina sidrenja i količina sidrenih vlakana. Bournas sa suradnicima [1] prvi put ispituje vlačnu čvrstoću FRP sidrenih anкера s lepezastim završetkom postavljenim preko slojeva FRP ili TRM platna. Na slici 5. je prikazan način ojačanja stupova FRP sidrima u području spoja s temeljem. Na slikama 6. i 7. prikazani su načini otkazivanja kod navedenog načina sidrenja.



Slika 5. Povezivanje FRP sidra na spoj AB stupa s temeljem: a) odgovarajuće pripremljen uzorak prije pojačavanja; b) lijepljenje prvog sloja mreža od ugljičnih vlakana (epoksidnom smolom ili mortom); c) impregnacija snopa ugljičnih sidara epoksidnom smolom i mortom; d) postavljanje ugljičnih sidara u sidrene otvore u temelju; e) postavljanje sidrenih vlakana preko ugljičnog platna u obliku lepeze; f) lijepljenje zadnjeg sloja mreža od ugljičnih vlakana preko lepeze sidra



Slika 6. Otkazivanje sidara uslijed vlačnog izvlačenja: a) sidra: 4Φ6; b) sidra: 1Φ12

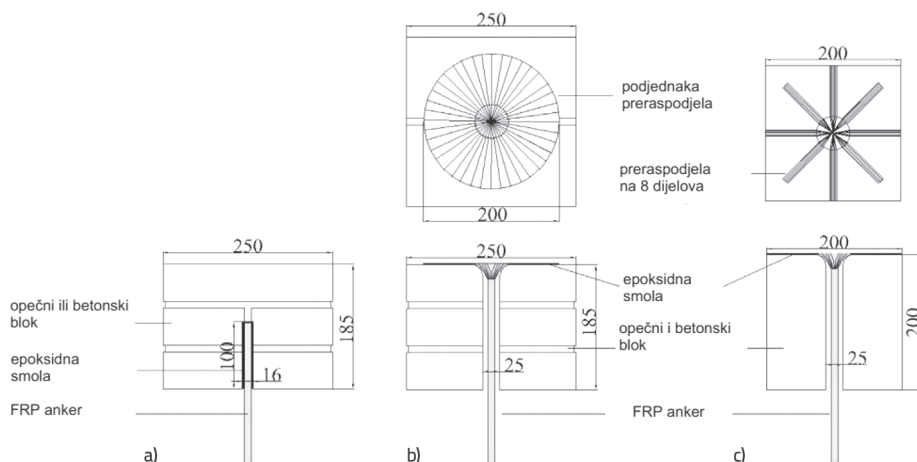
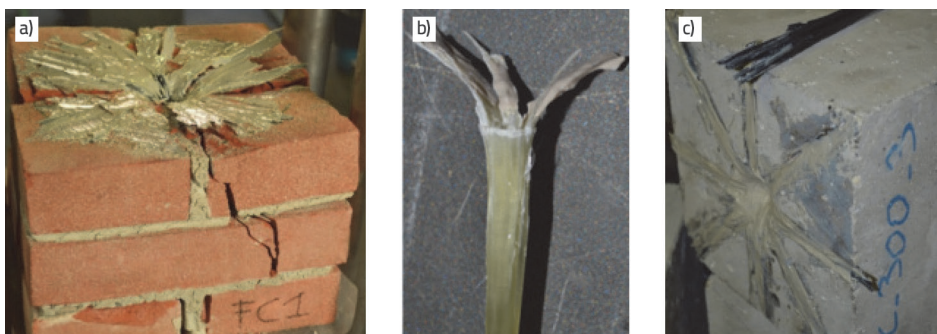


Slika 7. Otkazivanje sidara uslijed odvajanja i izvlačenja ugljičnih sidara (2Φ9) lijepljenih mortom od TRM platna

Istraživanja Bournasa i suradnika [1] pokazala su da je uporaba ugljičnih FRP sidara učinkovit način u sprječavanju preranog odvajanja FRP i TRM platna od površine betona. Ako su dobro usidrena u beton i povezana FRP platnom na površini elementa, sidra otkazuju uslijed vlačnog izvlačenja. Ako se broj vlakana u sidru udvostruči i ako se radi o sidrenju FRP-a, dobiva se povećanje vlačne čvrstoće do 70 %, dok kod sidrenja TRM-a povećanje iznosi 50 % pri korištenju identičnih sidara. Unatoč ograničenom broju uzoraka ispitanih u radu [1], svi rezultati upućuju na to da je sidrenje sidrima od FRP-a obećavajuće rješenje za sprječavanje preuranjenog odvajanja lijepljenih FRP ili TRM sustava pojačanja.

Carozzi sa suradnicima [4] ispitivao je vlačnu vezu između CFRP i GFRP sidara i uzorka od betona i opeke. Ispitivanje je provedeno na ukupno 53 uzorka, od čega je na 22 uzorka ispitivanje provedeno s usidrenjem FRP sidara u uzorke od opeke i betona te na 31 uzorku od opeke i betona sidrenjem FRP sidrima s lepezastim završetkom. Kod svih uzoraka sastavljenih od CFRP i GFRP sidra ugrađenog u opeku došlo je do otkazivanja slomom opeke. Pri ispitivanju na betonskim uzorcima pojavljuju se dva mehanizma sloma. Prvi je otkazivanje sidra pri dnu slobodnog dijela sidra, a drugi odvajanje od uzorka. Uzorci od opeke s postavljenim lepezastim sidrima pokazali su dva različita načina otkazivanja, ovisno o mehaničkim svojstvima uzoraka. Uglavnom su to otkazivanja uslijed odvajanja lepezastog sidra od uzorka i puknuće sidra na slobodnom kraju. Kod uzoraka od pjeskarene opeke s lošijim mehaničkim svojstvima i mortom na bazi vapna došlo je do odvajanja vlakana lijepljenih na površini te slom uzorka. Kod uzoraka od opeke povezanih cementnim mortom, boljih meha-

ničkih svojstava, došlo je do otkazivanja uslijed pucanja sidra pri slobodnom kraju. U tim slučajevima do otkazivanja ne dolazi zbog svojstava uzorka, nego se javlja pri kraju slobodne dužine zbog puknuća sidra. Kod uzoraka izrađenih od betonskih blokova otkazivanje se javlja zbog puknuća sidra na kraju slobodne dužine (slike 8. i 9.).



Slika 9. Postavljanje sidra na testnim uzorcima: a) sidro fiksirano u bloku; b) sidro podjednako raspodijeljeno na površini; c) sidro raspodijeljeno u 8 jednakih dijelova [3]

Iz navedenog istraživanja konačno se može zaključiti da se preraspodjela vlakana sidra u obliku zvijezde s osam krakova pokazala kao najbolja (slika 9.c), s eksperimentalnom čvrstoćom prijanjanja približno vlačnoj čvrstoći. Također je kod svih ispitanih uzoraka očito da je postupak vrlo osjetljiv na ručnu pripremu zbog koje su rezultati dosta raznoliki.

2.2 Sidrenje pri pojačanju na posmik armiranobetonskih T-greda TRM-om

Istraživanje koje su proveli Tetta, Koutas, Bournas, u [5] prikazuje pojačanje armiranobetonskih greda T-presjeka tkaninom armiranih mortova i sidara na bazi tkanine te usporedbu sa sidrenjem pomoću ovijanja hrpta u obliku slova "U". Ključni parametri su upotreba sidara na bazi tkanine kao sidrišta ovijenog hrpta (sidra s lepezastim krajem), broj slojeva TRM-a, geometrija tkanine, materijal tkanine (dvije tkanine od ugljičnih vlakana i tkanine sa staklenim vlaknima), učinkovitost ekvivalentnog FRP ovijanja za slučaj bez sidara. Grede su statički bile opterećene u tri točke: jedna je testirana nepojačana, dok je ostalih deset pojačano prije ispitivanja. Osnovni zaključci tog istraživanja su sljedeći: upotreba sidra na bazi tkanine drastično povećava učinkovitost tehnike ovijanja ugljičnim TRM-om u obliku slova "U". Potpuno sidrenje slojeva TRM-a od ugljičnih vlakana poboljšalo je učinkovitost ovijanja 98 % - 148 %, ovisno o broju TRM slojeva i geometriji tkanine. Ako je TRM odgovarajuće sidren, mogu se postići visoke efektivne deformacije koje variraju od 3,24 ‰ do 5,21 ‰ (ovisno o količini slojeva TRM-a i količini sidara). Nasuprot tome, kod ovijanja bez sidrenja vrijednosti variraju 2,03 ‰ do 2,58 ‰. Sidrenje dvaju slojeva TRM-a od ugljičnih vlakana gotovo je ekvivalentno postavljanju četiri sloja TRM-a od ugljičnih vlakana bez sidrenja, što rezultira značajnim uštedama. Može se zaključiti da je ovijanje TRM-om jednako učinkovito kao i FRP-om pri povećanju nosivosti na posmik kod armiranobetonskih T-greda, [5].

Niemitz i dr. [6] ispitivali su učinkovitost CFRP sidra pri opterećenju na posmik armiranobetonskih blokova armiranih CFRP platnima. Otkrili su da je upotreba FRP sidra u kombinaciji sa FRP lijepljenim platnima održiva tehnika te su proučili učinkovitost FRP sidara u odnosu na njihove geometrijske karakteristike.

Upotrebu lepezastih sidara kod zidanih konstrukcija prikazali su Bori i dr. [7], tako što su upotrijebili FRP sidra kod zidanih lukova ojačanih GFRP trakama ili CFRP pločama. Uočeno je da se upotrebom lepezastih sidara može spriječiti preuranjeno odvajanje pojačanja od površine luka. Nije zabilježena smanjena nosivost zbog bušenja rupa za postavljanje lepezastih sidara.

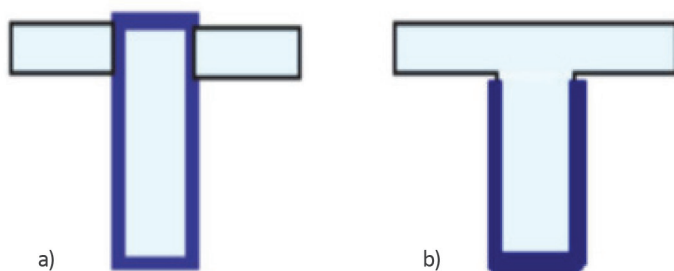
2.3 Ostali oblici sidrenja kod FRP-a i TRM-a

Da bi se moglo kontrolirati preuranjeno otkazivanje pojačanja, rub FRP ili TRM platna mora biti sidren. Postoji više načina sidrenja uz one već navedene, pri kojem pojačanje dostiže potpuno kompozitno djelovanje i sprječava otkazivanje uslijed odvajanja od elementa.

Melo, Araujo i Nagato u [11] prikazuju da se u slučaju potpunog ovijanja elementa tkaninom od ugljičnih vlakana, kako je prikazano na slici 10.a, posmična čvrstoća povećava za 106 %. Međutim, Al-Mahaidi i Kalfat u [12] navode kako potpuno ovijanje ima ograničenu uporabu. Kod potpunog ovijanja potrebno je bušiti otvore u

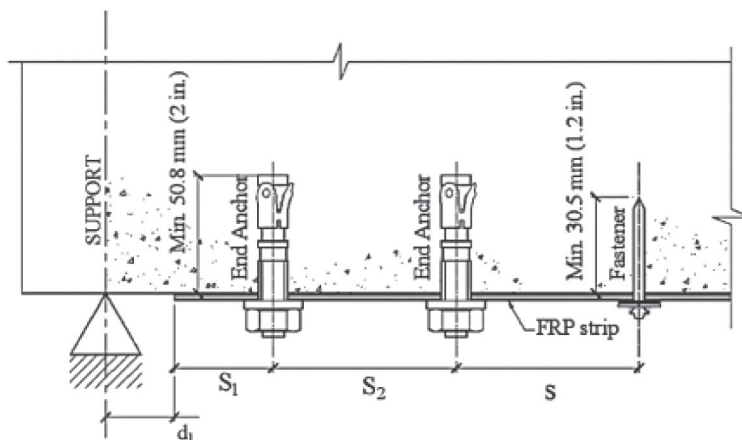
betonskom elementu kako bi se mogao oviti cijeli element, što utječe na njegovu cjelovitost.

Al-Amery i Al-Mahaidi u [13] ispituju šest armiranobetonskih greda pojačanih ugljičnim FRP lamelama u više slojeva, sidrenih trakama od ugljičnih vlakana ovijanjem u obliku slova "U", kako je prikazano na slici 10.b. Zaključili su da je čvrstoća na savijanje povećana za 95 % u odnosu na povećanje od 15 % u slučaju bez sidrenja ovijanjem.



Slika 10. Sidrenje ovijanjem trakama od ugljičnih vlakana: a) potpuno ovijanje, b) ovijanje u obliku slova "U"

Sidrenje FRP i TRM platna može se provesti mehaničkim pričvršćenjima (vijcima ili čeličnim vilicama). Upotrebom vijaka pri sidrenju platna (slika 11.) postiže se povećanje nosivosti greda više od 50 % u odnosu na upotrebu FRP sidara. Oštećenje se pojavljuje uslijed posmičnih pukotina lociranih pored vijaka, [10].



Slika 11. Sustav mehaničkog sidrenja vijcima

3 Zaključak

Dosadašnja istraživanja provedena na raznim načinima sidrenja FRP-a i TRM-a pokazala su određene rezultate, međutim na ograničenom broju uzoraka. Istraživanja se uglavnom provode uzimajući u obzir nekoliko parametara koji nisu dostatni da bi se mogli definirati potpuno sigurni modeli proračuna koji bi projektantima dali mogućnost projektiranja pojačanja konstrukcija. Odgovarajuće sidrenje je jedan od ključnih parametara pri pojačavanju postojećih armiranobetonskih i zidanih elemenata. Prema tome, mora se uložiti dodatni napor pri definiranju analitičkih modela sidrenja uzimajući u obzir utjecaj više parametara kao što su optimalan broj i raspored sidara, kut ugradnje sidra, vrsta TRM-a koji se sidri, količina slojeva tkanine, karakteristika tkanine. Potrebno je provesti i dodatna eksperimentalna istraživanja u svrhu boljeg razumijevanja ponašanja sidara pri različitim vrstama opterećenja. Osim toga, treba posebno istaknuti učinkovitost sidrenja koja su pojačana FRP-om i TRM-om pri visokim temperaturama.

Daljnje istraživanje potrebno je usmjeriti na analizu prijenosa naprezanja (sile) sa sidra na FRP traku ili tkaninu, jer najčešće otkazivanje je izvlačenje sidra kao rezultat nedovoljnog preklopa s pojačanjem koje se sidri kao i načina postavljanja lepeze sidra u odnosu na FRP ili TRM materijal. Također je istraživanjem potrebno usmjeriti na analizu duljina sidrenja ovisno o vlačnoj čvrstoći FRP sidra, promjera sidra, te što je najvažnije odnosa promjera sidra i rupe u koju se postavlja, kao i udaljenosti od ruba betona i same kvalitete betona. Danas u primjeni čeličnih kemijskih sidara koji su analogni FRP sidrima kod betona, su dani izrazi ovisno o mehanizmu sloma, kao i detaljni opisi njihove izvedbe od promjera rupe u koju se ugrađuje, načina ugradnje sidra, debljine epoksi ljepila kao i udaljenosti od ruba betonskog presjeka. Realno za FRP sidra nema izraza za proračunsku otpornost kao niti propisane duljine preklopa s obzirom na pojačanje koje se sidri. U praksi se uglavnom propisuje postupak ugradnje i prethodna ispitivanja čupanjem, pa prema postignutim silama korigira se broj sidara.

Važno je istaknuti da problematika sidrenja postoji koliko i primjena FRP-a, a lepezasta sidra se primjenjuju skoro 10 godina u Hrvatskoj. Za sada se ta primjena temelji na inženjerskoj analogiji s klasičnim armaturnim ankerima za sidrenje čelične armature, kao i S-kuka za povezivanje. Ključno je u budućem istraživanju pokušati numerički definirati nosivost i učinkovitost tih sidrenja o ključnim parametrima kao što je duljina preklopa, dubina sidrenja i sl.

Literatura

- [1] Bournas, D.A., Pavese, A., Tizani, W.: Tensile capacity of FRP anchors in connecting FRP and TRM sheets to concrete, Article in Engineering Structures, 82 (2015), pp. 72-81.
- [2] Prota, A., Manfredi, G., Balsamo, A., Nanni, A., Cosenza, E.: Innovative technique for seismic upgrade of RC square columns. Proceedings of the 7th International Symposium: fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures, SP- 230, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, pp. 1289-304, 2005.
- [3] Ozdemir, G., Akyuz, U.: Tensile capacities of CFRP anchors. Advances in earthquake engineering for urban risk reduction. Nato science series: IV: Earth and environmental sciences. Netherlands: Springer, pp. 471-487, 2006.
- [4] Carozzi, F.G., Colombi, P., Fava, G., Poggi, C.: Mechanical and bond properties of FRP anchor spikes in concrete and masonry blocks, Composite Structures, 18 (2018), pp. 185-198.
- [5] Tetta, Z.C., Koutas, L.N., Bournas, D.A.: Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors, Composites Part B 95, pp. 225-239, 2016.
- [6] Niemitz, C.W., James, R., Brena, S.F.: Experimental behavior of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets attached to concrete surfaces using CFRP anchors, ASCE J Comp Constr, 14 (2010) 2 pp. 185-94.
- [7] Borri, A., Castori, G., Corradi, M.: Intrados strengthening of brick masonry arches with composite materials, Compos Part B 42, pp. 1164-1172, 2011.
- [8] Kim, S.J., Smith, S.T.: Pullout strength models for FRP anchors in uncracked Concrete, ASCE J Comp Constr, 14 (2010) 4, pp. 406-414.
- [9] Ozbakkaloglu, T., Saatcioglu, M.: Tensile behavior of FRP anchors in concrete, ASCE J Comp Constr, 13 (2009) 2, pp. 82-92.
- [10] Baiuk, A.A.: PhD. thesis: Improving bond strength for CFRP-RC beams interface, pp. 19-23, 2016.
- [11] Melo, G., Araujo, A., Nagato, Y.: Strengthening of RC T-beams in shear with carbon fibre sheet laminates (CFRP), u FRPRCS-6, fibre reinforced polymer reinforcement for concrete structures, Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003.
- [12] Al-Mahaidi, R., Kalfat, R.: Investigation into CFRP plate end anchorage utilising uni-directional fabric wrap, Composite Structures, 93 (2011) 2, pp. 821-830, 2011.
- [13] Al-Ameri, R., Al-Mahaidi, R.: Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP straps. Composite Structures, 75 (2006) 1-4, pp. 457-464.

Interdisciplinarni i multidisciplinarni pristup istraživanju tijekom izrade doktorskog rada

Doc.dr.sc. **Gordon Gilja**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ggilja@grad.hr

Sažetak

U sklopu predavanja predstavljeno je osobno iskustvo predavača tijekom izrade doktorskog rada u sklopu poslijediplomskog doktorskog studija građevinarstva na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Fokus predavanja je na aktivnostima koje prethode pisanju doktorskog rada: pregledu stanja znanja, osmišljavanju konkretnog predmeta znanstvenog istraživanja i pripadajuće hipoteze te razrada korištenih znanstvenih metoda za ostvarivanje ciljeva istraživanja. Prikazana je motivacija i svrha istraživanja na konkretnoj temi s definicijom znanstvenog doprinosa rada i primjenom rezultata istraživanja. Opisan je interdisciplinarni i multidisciplinarni pristup istraživanju te ostvarena međuinstitucijska suradnja s domaćim znanstvenim institucijama, javnim ustanovama i privrednim subjektima koja je omogućila ostvarivanje dodane vrijednosti istraživanja. Posebno je dan osvrt na suradnju s mentorom i važnost praćenja i podrške tijekom izrade rada od strane stručnjaka u polju istraživanja. Zaključno je opisano kako su se stečena iskustva odrazila na osobnu promjenu percepcije istraživačkog rada.

Interdisciplinary and multidisciplinary approach to research during doctoral studies

Abstract

This lecture presents personal perspective on research and study process during Postgraduate programme in Civil Engineering under University of Zagreb. Focus of the seminar are the activities preceding the writing process: literature review, definition of the research significance, formulation of a hypothesis as well as implementation of scientific methods for addressing the research aim. Motivation and purpose of the research is given for a specific dissertation topic with scientific contribution and applicability of the results. Interdisciplinary and multidisciplinary approach used in research is described, with realized partnership with national scientific institutions, public institutions and industry that generated added value through collaborative research. Emphasis is given on the role of the supervisor throughout the study and importance of support and feedback from the expert in the field during. As closure, explanation is given on the impact that acquired experiences had on personal shift in perspective on research definition.

Suradnja sa Sveučilištem u Stuttgartu tijekom i nakon doktorskog studija

Dr.sc. **Marija Kušter Marić**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, marijak@grad.hr

Sažetak

U predavanju će biti predstavljen istraživački put od odabira teme istraživanja koji se temelji na potrebama gospodarstva, preko znanstvenog usavršavanja na Sveučilištu u Stuttgartu i suradnje s drugim institucijama do vođenja znanstvenog projekta u koji su uključeni suradnici iz matičnog i inozemnog sveučilišta te gospodarskih subjekata. Istaknut će se glavne značajke dvojnog mentorstva i multidisciplinarnog pristupa istraživanju tijekom doktorskog studija. Na temelju prikazanog iskustva dat će se nekoliko zaključaka i savjeta vezanih za: (i) odabir teme i mentora za doktorski rad; (ii) traženje vanjske institucije za usavršavanje; (iii) umrežavanje te uspješnu i dugoročnu suradnju te (iv) ishode doktorskog studija potrebnih za uspješnu prijavu projektnih prijedloga.

Collaboration with the University of Stuttgart during and after PhD study

Abstract

The research path from selection of research topic based on the economic needs, through scientific training at the University of Stuttgart and cooperation with other institutions to management of a research project, involving collaborators from domestic and abroad universities and the business entities. The main features of the dual mentoring and multidisciplinary approach to research during PhD study will be highlighted. Few conclusions and advices related to: (i) selection of a research topic and mentor for PhD thesis; (ii) search for an external scientific training institution; (iii) networking and successful and long-term cooperation; as well as (iv) the outcomes of the PhD study needed for successful project proposal submission will be given based on the presented experience.

**SAŽECI OBRANJENIH
DOKTORSKIH RADOVA**
rujan 2017. - srpanj 2018.

**Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju rujan 2017. - srpanj 2018.
(abecednim redom)**

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
2017. godina	
Model upravljanja hidrotehničkim sustavima pomoću predviđanja nadziranim učenjem dr.sc. Jadran Berbić	167
Bočno-torzijsko izvijanje aluminijskih elemenata s otvorenim nesimetričnim porečnim presjekom dr.sc. Tihomir Dokšanović	168
Otpornost betonskih elemenata armiranih recikliranim čeličnim vlaknima pri zamoru dr.sc. Marina Frančić Smrkić	169
Primjena muljeva s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskoj industriji dr.sc. Domagoj Nakić	170
Sustav za rano upozorenje kod upravljanja građevinskim projektima dr.sc. Mariela Sjekavica	171
Numeričko modeliranje utjecaja interakcije armature i nekoherentnog zasipa u proračunu stabilnosti zidova od armiranoga tla dr.sc. Adis Skejić	172
2018. godina	
Oblikovanje standardnih turbokružnih raskrižja dr.sc. Tamara Džambas	173

dr.sc. Jadran Berbić

Životopis

Rođen je 1989. u Šibeniku. Diplomirao je 2013. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, na kojem je 2017. obranio i disertaciju. Akademске godine 2011./2012. kao koautor rada dobio je Rektorovu nagradu. Osim toga, dobio je nagradu za najboljega studenta diplomskoga studija za ak. god. 2011./2012. i 2012./2013. te nagradu Hrvatskih voda za najbolji diplomski rad u ak. god. 2012./2013. Od 2013. do 2015. radio je kao stručni suradnik na Katedri za vodnogospodarsku hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Od 2015. do 2016. radio je kao vanjski suradnik u Odjelu za graditeljstvo Tehničkoga veleučilišta u Zagrebu. Od 2017. godine radi kao stručni suradnik u Sektoru za hidrologiju Državnoga hidrometeorološkoga zavoda. Sudjelovao je u objavljivanju više znanstvenih radova te na konferencijama u zemlji.

Mentor: Izv.prof.dr.sc. **Eva Ocvirk**

Datum obrane: 27. 9. 2017.

Naslov doktorskog rada

Model upravljanja hidrotehničkim sustavima pomoću predviđanja nadziranim učenjem

Sažetak

Predviđeno ubrzano korištenje i trošenje dobara u idućim desetljećima zahtijeva izradu dugoročne strategije njihove upotrebe. Nužna pretpostavka postizanja ravnoteže između ekonomske učinkovitosti, održivosti i zaštite okoliša jest učinkovito i djelotvorno korištenje vodnih dobara. Stoga se hidrotehničke sustave danas redovito planira kao višenamjenske. Izraženije klimatske varijacije i promjene mogu osjetno izmijeniti prirodu hidrološkoga režima i utjecati na politiku upravljanja sustavima. Za dugoročno planiranje od velike je važnosti izgradnja modela za predviđanje hidroloških varijabli. U radu je dan model, odnosno metodologija upravljanja višenamjenskim hidrotehničkim sustavima, prilagodljiv različitim hidrološkim prilikama, a uz pomoć predviđanja nadziranim učenjem. Uz prikazani pregled modeliranja značajnijih hidroloških varijabli vezanih uz planiranje, najviše se pozornosti usmjerilo je na modeliranje dotoka, ključne varijable za analizu dostupnosti i na optimalnu raspodjelu vode korisnicima. Osim toga, težište je usmjereno i na količinu primjera potrebnih za izgradnju modela odgovarajuće preciznosti, s verifikacijom preciznosti kao glavnim kriterijem potvrde pouzdanosti modela za dugoročno planiranje. Znanstveni doprinos: izrada metodologije dugoročnoga upravljanja višenamjenskim hidrotehničkim sustavima prilagodljivim klimatskim promjenama, izrada simulacijsko-optimizacijskoga modela za provedbu analize u metodologiji, istraživanje primjenjivosti takvoga alata za procjenu zadovoljenja potreba ovisnih o sustavu.

dr.sc. Tihomir Dokšanović

Životopis

Rođen je 1987. u Vinkovcima. Godine 2009. završio je preddiplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, gdje je 2011. diplomirao. Disertaciju je obranio na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Dobitnik je Državne stipendije za osobito nadarene studente (2007. – 2011.), Dekanove nagrade za najbolji uspjeh tijekom diplomskog studija (2010./2011.) i Rektorove nagrade (2010./2011.). Od 2011. zaposlen je na Građevinskom fakultetu u Osijeku kao asistent u Zavodu za materijale i konstrukcije. Njegovi su znanstveni interesi vezani uz aluminijske i čelične konstrukcije te ispitivanje konstrukcija. Kao autor i koautor objavio je 13 radova, od kojih šest u časopisima zastupljenima u *Current Contents* i/ili *Science Citation Index – Expanded* bazama. Član je tehničkoga odbora TO548/PO9 od ožujka 2016.

Mentori: Prof.dr.sc. **Ivica Džeba**
Prof.dr.sc. **Damir Markulač**

Datum obrane: 15. 11. 2017.

Naslov dokorskog rada

Bočno-torzijsko izvijanje aluminijskih elemenata s otvorenim nesimetričnim porečnim presjekom

Sažetak

Povoljna mehaničko-fizikalna svojstva čine aluminijske legure izvrsnim izborom za široku primjenu u konstrukcijama. Zbog relativno maloga modula elastičnosti i velike vitkosti elementi su podložniji lokalnim i globalnim oblicima gubitka stabilnosti. U tom se području tehnička regulativa intenzivno razvija kako bi se dobile dostatno pouzdane konstrukcije. Upravo je takav slučaj bočnotorzijско izvijanje nesimetričnih otvorenih profila, koje se pretežno upotrebljavaju u nosivim konstrukcijama ovojnice zgrada. Sadašnji proračunski model otpornosti nije adekvatan za takve elemente, a rezultati provedenih istraživanja su vrlo ograničeni. Prijedlog i vrjednovanje proračunskoga modela, bitnoga za cjelovitu primjenu aluminijskih konstrukcija, izveden je na temelju opsežnih laboratorijskih ispitivanja nosivosti na bočnotorzijско izvijanje, proširenim s pomoću numeričkog modeliranja konstrukcijskih elemenata. Za potrebe numeričkoga modeliranja izvršena je procjena podudarnosti analitičkih opisa stvarnoga ponašanja materijala te nekoliko parametarskih analiza za potrebe verifikacije modela. Pri numeričkom proširenju rezultata korišteni su, na temelju eksperimenata, verificirani geometrijski i materijalno nelinearni modeli s početnom nesavršenošću. Nadalje, provedene su parametarske analize te odgovarajuće probabilističko vrednovanje u svrhu ocjene predloženoga proračunskoga modela. Uz složeniji proračunski model predložena su dva pojednostavljena načina obuhvaćanja bočnotorzijškoga izvijanja elemenata s nesimetričnim porečnim presjekom, koji su primjereniji za svakodnevnu inženjersku praksu.

dr.sc. Marina Frančić Smrkić

Životopis

Rođena je 1986. u Zagrebu. Diplomirala je 2010. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, na kojem je 2017. obranila i disertaciju. Od 2011. radi na tom fakultetu kao znanstvena novakinja u Zavodu za tehničku mehaniku, gdje sudjeluje u znanstvenom radu na domaćim i inozemnim znanstvenoistraživačkim projektima. Sudjeluje u stručnim poslovima Zavoda za tehničku mehaniku, a u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija djeluje kao ispitivačica za akreditirane metode. Objavila je tri rada u znanstvenim i stručnim časopisima, sedam radova na međunarodnim konferencijama, tri rada na domaćim konferencijama te je koautorica poglavlja u knjizi.

Mentor: Izv.prof.dr.sc. **Domagoj Damjanović**

Datum obrane: 15. 12. 2017.

Naslov doktorskog rada

Otpornost betonskih elemenata armiranih recikliranim čeličnim vlaknima pri zamoru

Sažetak

U radu se istraživalo ponašanje pri zamoru hibridnoga mikroarmiranoga betona, koji nastaje dodavanjem industrijskih i recikliranih čeličnih vlakana iz otpadnih automobilskih guma u beton. Utvrđena je svrhovitost primjene recikliranih čeličnih vlakana kao armature u konstrukcijskim elementima te je proučena mogućnost djelomične zamjene klasične armature čeličnim vlaknima, uz zadovoljenje istih uvjeta otpornosti pri zamoru i ekološki doprinos u smislu rješavanja problema odlaganja otpadnih automobilskih guma. Utvrđeno je ponašanje hibridnoga mikroarmiranoga betona pri zamoru. Vrednovana je prikladnost primjene postojećih proračunskih modela za zamor običnoga betona za primjenu na mikroarmiranom i hibridnom mikroarmiranom betonu. Utvrđeno je da proračunski model fib Model Code nije primjenjiv za mikroarmirane betone te je dan prijedlog njegove korekcije. Provedeno je vrednovanje materijalnih modela običnoga i hibridnoga mikroarmiranoga betona na temelju usporedbe eksperimentalnih rezultata i numeričke analize. Opsežnim eksperimentalnim istraživanjem dan je doprinos u oblikovanju i definiranju postavki ispitivanja zamora armiranobetonskih elemenata realnih veličina od običnoga i hibridnoga mikroarmiranoga betona. Vrednovana je prikladnost primjene dostupnih modela za proračun zamora armiranobetonskih elemenata od običnoga betona na elemente od hibridnoga mikroarmiranoga betona. Utvrđeno je i vrednovano ponašanje pri zamoru hibridnih mikroarmiranih elemenata s reduciranom klasičnom armaturom u odnosu na postojeća rješenja.

dr.sc. Domagoj Nakić

Životopis

Rođen je 1988. u Splitu, gdje je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 2012. s najvećom pohvalom, obranivši rad Optimalizacija vodoopskrbnog sustava Velika Gorica na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. U veljači 2013. na tom se fakultetu zaposlio kao stručni suradnik te od početka 2015. radi kao stručni suradnik na znanstvenom projektu RESCUE koji financira HRZZ. Na početku 2017. postao je asistent zaposlen na tom projektu. Aktivno je sudjelovao na brojnim znanstvenim i stručnim konferencijama, na kojima je dva puta nagrađen nagradom za najbolju prezentaciju. Sudjelovao je na više od 30 znanstvenih i stručnih radova. Tijekom studija bio je nagrađen Dekanovom nagradom. Dobitnik je Priznanja za postignuti uspjeh u prvoj godini preddiplomskoga studija te Nagrade Hrvatskoga saveza građevinskih inženjera za najbolji diplomski rad iz područja građevinarstva, za smjer hidrotehnike.

Mentori: Doc.dr.sc. **Dražen Vouk**
 Prof.dr.sc. **Nina Štirmer**

Datum obrane: 18. 12. 2017.

Naslov doktorskog rada

Primjena muljeva s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskoj industriji

Sažetak

Zbrinjavanje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) skup je te ekološki i socijalno osjetljiv postupak. Sve stroži propisi zahtijevaju usklađenost s temeljnim postavkama održivoga razvoja, odnosno upotrebu mulja kad god je moguće, vodeći pritom računa o minimiziranju utjecaja na okoliš. U radu je ispitivana mogućnost i opravdanost upotrebe pepela dobivenoga laboratorijskim spaljivanjem mulja pri temperaturama 800, 900 i 1000 °C kao zamjene do 30 % cementa u proizvodnji morta i betona. Dani su kemijski sastojci i fizikalne karakteristike pepela u odnosu na njihovu pogodnost za korištenje u cementnim materijalima te svojstva cementnih kompozita sa zamjenskim udjelima pepela. Znanstveni doprinosi provedenoga istraživanja ogledaju se u definiranju metodologije za procjenu tehničko-ekoloških utjecaja te određivanju najpogodnije temperature spaljivanja mulja za korištenje pepela u betonskoj industriji (na osnovi analiziranih tehničkih kriterija 900 °C), na oblikovnoj višekriterijskoj metodologiji vrednovanja eksperimentalnih mješavina te procjeni utjecaja na okoliš na osnovi analiza cjeloživotnoga ciklusa (LCA).

dr.sc. Mariela Sjekavica

Životopis

Rođena je 1989. u Dubrovniku. Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu diplomirala je 2013. kao najbolji student generacije. Na tom je fakultetu 2017. obranila i disertaciju. Od 2014. zaposlenica je Hrvatskih voda, na radnome mjestu specijalistice za razvoj sustava upravljanja unutar Sektora za projekte sufinancirane sredstvima EU-a. U akademskoj godini 2014./2015. i 2015./2016. radila je na matičnom fakultetu kao vanjska suradnica – asistentica. Posjeduje IP-MA-in certifikat za upravljanje projektima te certifikat iz područja javne nabave. Objavila je više znanstvenih i stručnih radova te je sudjelovala na brojnim konferencijama i edukacijama u zemlji i inozemstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. **Mladen Radujković**

Datum obrane: 19. 10. 2017.

Naslov doktorskog rada

Sustav za rano upozorenje kod upravljanja građevinskim projektima

Sažetak

Današnji je svijet svijet projekata. Upravljanje projektima je zanimanje koje je u središtu interesa raznih gospodarskih djelatnosti, pa tako i građevinarstva. Zbog osobitoga značenja i složenosti javnih građevinskih projekata, kao što su vodnokomunalni, postoji kontinuirana težnja unaprjeđenja postojećih alata, tehnika i metoda za upravljanje njima, koji će omogućiti brže i kompetentnije donošenje odluka, veću kvalitetu praćenja i kontrole te povećati vjerojatnosti za uspješno upravljanje projektima, kao i uspjeh samih projekata. U radu su ovi ciljevi ostvareni spajanjem dvaju područja znanja: onoga o uspjehu projekata i uspjehu upravljanja projektima te onoga o sustavima za rano upozorenje. Napravljen je opsežan presjek literature na relevantnim područjima. Nakon toga je dan prijedlog metodologije za izradu sustava za rano upozorenje kod upravljanja građevinskim projektima koji se temelji na faktorima uspjeha projekata, a čiji je rani odgovor dan kroz tri upravljačke dimenzije: rizici, promjene i ograničenja; kompetencije; metode, tehnike i alati. Sustav je izrađen na temelju rezultata provedenoga istraživanja (slijedom podataka prikupljenih putem Fokus grupe te anketnoga upitnika i njihove obrade metodama deskriptivne i inferencijalne statistike - regresijske analize). Izrađeni je sustav potom testiran na projektima vodnokomunalnoga sektora. Provedeno je istraživanje pokazalo kako je moguće izraditi i primijeniti sustav za rano upozorenje, temeljen na indikatorima uspjeha projekata, kojim se može povećati uspjeh upravljanja projektima vodnokomunalnoga sektora.

dr.sc. Adis Skejić

Životopis

Rođen je 1984. godine. Nakon završene srednje škole 2002. se upisao na Građevinski fakultet Sveučilišta u Sarajevu u Bosni i Hercegovini te je diplomirao 2008. Dobitnik je povelje Sveučilišta. Na početku 2008. zaposlio se kao asistent za znanstveno područje geotehnike te istodobno i u Institutu za geotehniku i geologiju matičnoga fakulteta u Sarajevu. Potkraj 2008. upisao se na poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. U zvanje višega asistenta na matičnom fakultetu u Sarajevu izabran je 2014. godine. Stručni ispit za geotehniku položio je 2012. Osim 25 objavljenih znanstvenih radova, tijekom desetogodišnjega iskustva nositelj je većine stručnih poslova u Institutu za geotehniku i geologiju pri Građevinskom fakultetu u Sarajevu.

Mentor: Prof.dr.sc. **Tomislav Ivšić**

Datum obrane: 3. 10. 2017.

Naslov dokorskog rada

Numeričko modeliranje utjecaja interakcije armature i nekoherentnog zasipa u proračunu stabilnosti zidova od armiranoga tla

Sažetak

Utvrđivanje nosivosti različitih geometrijskih konfiguracija zidova od armiranoga tla, obuhvaćajući pritom interakciju pojedinih elemenata, provodi se u ovom radu primjenom numeričkih i fizičkih modela. U radu se detaljno istražuje interakcija armature i nekoherentnoga zasipa u uvjetima pokusa izvlačenja i u zidovima. Numeričkim 2D i 3D simulacijama pokusa izvlačenja u radu se istražuju utjecaji rubnih uvjeta na rezultat pokusa, a simulacijama zidova istražuje se utjecaj interakcije armature i nekoherentnoga zasipa na proračun stabilnosti zidova. Rezultati analiza pokusa izvlačenja iskorišteni su za definiranje preporuka za oblikovanje kutije uređaja za taj pokus. Za zidove su dane preporuke principa modeliranja pojedinih komponenti i njihove interakcije. Osim numeričkih simulacija, u radu su objavljeni rezultati nekoliko umanjjenih fizičkih modela zidova uz opažanje pomaka cjelokupnog zasipa digitalnom kamerom kroz prozirnu staklenu bočnu stijenku. Rezultati istraživanja uspostavljaju vezu između dimenzija sanduka, zbijenosti zasipa i granične nosivosti zidova. Radom se daju preporuke za oblikovanje i pripremu kutije i armature pri provođenju pokusa izvlačenja. Temeljiti je i potpunije od dosadašnjih spoznaja pokazano da umanjjeni fizički modeli zidova opterećeni trakastim opterećenjem na vrhu zida mogu otkazati i zbog izvlačenja armature iz zone sidrenja (prije svega u gornjem dijelu zida), a ne samo zbog vlačnoga sloma armature ili globalnoga sloma.

dr.sc. Tamara Džambas

Životopis

Rođena je 1988. u Novoj Gradiški. Diplomirala je 2012. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Na tom je fakultetu 2018. obranila doktorski rad. Od 2012. zaposlena je kao asistentica u Zavodu za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, gdje radi na znanstvenim, nastavnim i stručnim poslovima. Kao suradnik radila je na znanstvenom projektu koji je financiralo Ministarstvo znanosti i obrazovanja. Pohađala je nekoliko radionica iz područja oblikovanja prometnih površina te akustike. Kao članica organizacijskog odbora sudjelovala je u organizaciji tri međunarodna znanstvena skupa. U koautorstvu je objavila pet znanstvenih radova te sudjelovala na devet konferencija u zemlji i inozemstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. **Vesna Dragčević**

Datum obrane: 11. 7. 2018.

Naslov doktorskog rada

Oblikovanje standardnih turbokružnih raskrižja

Sažetak

Istraživanjima provedenima u okviru izrade rada definirano je optimalno oblikovanje elemenata standardnih turbokružnih raskrižja ovisno o različitim utjecajnim parametrima: mjerodavnom vozilu, unutarnjem polumjeru kružnog kolnika, širini prometnih trakova, pomaku i kutu osi sporednih privoza te provoznim brzinama. Određene su granične vrijednosti unutarnjeg polumjera kružnog kolnika te pomaka i kutova osi sporednih privoza koje su primjenjive na ovom tipu raskrižja, uzimajući u obzir realnu prometnu situaciju. Definiran je novi (poboljšani) pristup projektiranju standardnih turbokružnih raskrižja zasnovan na zakonitostima geometrije kretanja mjerodavnog vozila. Takav pristup rezultira optimalnim oblikovanjem raskrižja u pogledu zauzetosti okolnog prostora, provoznosti te provozne brzine. Znanstveni doprinos može se sažeti ovako: definiran je postupak oblikovanja elemenata standardnog turbokružnog raskrižja uzimajući u obzir realne prometne prilike i definirao optimalno oblikovanje elemenata standardnog turbokružnog raskrižja uzimajući u obzir zakonitosti geometrije kretanja ovisno o različitim utjecajnim parametrima: mjerodavno vozilo, polumjer kružnog kolnika, širina prometnih trakova, pomak osi privoza, kutovi osi privoza i provozne brzine mjerodavnog vozila. Osim toga, određene su granične vrijednosti pomaka i kutova osi privoza koje su primjenjive na ovom tipu raskrižja. Dodatno praktično značenje rada jest u mogućnost i primjene rezultata istraživanja u reviziji postojećih domaćih i inozemnih smjernica za projektiranje turbokružnih raskrižja.

ISBN 978-953-8168-29-1

