

3. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

11.-12. rujna 2017., 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
Prof.dr.sc. Krešimir Fresl (hrvatski)
Zoran Vulelija (engleski)

Tisak

Tiskara Zelina d.d., 2017.

Naklada

150 kom.

ISBN

978-953-8168-18-5

Zagreb, rujan 2017.

CIP zapis

je dostupan u računalnome katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 000971819.

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

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

3. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

11.-12. rujna 2017., 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
Izv.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	Zavod za zgradarstvo

Predgovor

Znanstvena okupljanja studenata poslijediplomskog doktorskog studija, njihovih mentora i nastavnika, a koja se održavaju u sklopu SIMPOZIJA DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA, najbolji su način razmjenjivanja iskustava i znanja iz svih područja građevinarstva. Potvrdu te činjenice daju do sada održani Simpoziji doktorskog studija, u 2015. i 2016. godini. Veliki interes koji su pokazali sudionici, konstruktivne i poticajne rasprave tijekom skupa potvrdili su ispravnost odluke o organiziranju tog simpozija. Iznimno zanimanje nakon održanih izlaganja doktoranada prve godine doktorskog studija te razmjene iskustava potaknuli su Odbor za znanost da i u idućim godinama nastavi s organizacijom *Simpozija doktorskog studija građevinarstva*. Važno je istaknuti da je organiziranje *Simpozija* obogatilo Istraživački seminar na doktorskome studiju Građevinskog fakulteta u Zagrebu.

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

Prvi Simpozij doktorskog studija građevinarstva održan je 14. i 15. rujna 2015. godine za koji je priređen i zbornik svih radova koji su predstavljani na skupu. Drugi simpozij doktorskog studija građevinarstva održan je 12. i 13. rujna 2016. godine, i za njega je također priređen zbornik svih radova koji su predstavljani na skupu. Osim doktoranada i njihovih mentora s Građevinskog fakulteta u Zagrebu, na 2. simpoziju su sudjelovali i doktorandi s drugih Građevinskih fakulteta. U zborniku 2. *Simpozija* objavljeni su i sažeci doktorskih radova koji su obranjeni na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u razdoblju od 2011. do 2015. godine.

Za ovaj 3. *simpozij doktorskog studija građevinarstva* svaki je doktorand prve godine studija priredio rad u koautorstvu s mentorom. Ukupno je priređeno 11 radova, od čega su 9 radova pripremili doktorandi i njihovi mentori s Građevinskog fakulteta u Zagrebu, 1 rad pripremili su doktorand i njegov mentor s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Beču, dok su 1 rad, na temu numeričkog modeliranja s računalnim programom Abaqus, pripremili kolege koji su ovaj računalni program koristili za potrebe istraživanja u svojim doktorskim radovima. Ta zanimljiva tema potaknula je i organiziranje radionice na temu numeričkog modeliranja za koju vjerujemo da će biti zanimljiva i korisna studentima doktorskog studija.

Svaki rad u zborniku su recenzirala dva recenzenta. Posebno je važno istaknuti da je svakom radu u zborniku 3. *Simpozija* dodijeljen i DOI (eng. *Digital Object Identifier*) broj koji jednoznačno identificira publikaciju i objavljeni rad te jamči točnost podataka i internetsku lokaciju na kojoj se podaci nalaze. Ovo je prvi zbornik Građevinskog fakulteta u Zagrebu u kojem su radovima

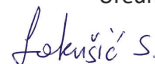
dodijeljeni DOI brojevi. U drugom dijelu zbornika dani su sažeci svih doktorskih radova koji su obranjeni na Građevinskom fakultetu u Zagrebu u razdoblju od 2016. do srpnja 2017. godine.

Zbornik *3. simpozija doktorskog studija građevinarstva* priređen je zahvaljujući velikom trudu svih autora, recenzenata i urednika. Velika pomoć u pripremi zbornika bili su i suradnici koji su pridonijeli da se dobije usklađenost radova svih autora. Priređeni su radovi iz svih područja građevinarstva: geotehnike, hidrotehnike, inženjerskih konstrukcija, materijala u građevinarstvu, mehanike konstrukcije, organizacija i ekonomike građenja te prometnica.

Nadam se da će *3. Simpozij* još više potaknuti aktivno istraživanje u svim područjima građevinarstva te omogućiti razvoj novih znanja. Kod razvoja novih znanja i prepoznatljivosti istraživača, jedan od važnih elemenata je svakako međunarodna suradnja na znanstvenim istraživanjima. Poticanjem istraživanja i međunarodne suradnje na znanstvenim projektima može se postići stvaranje novih znanja, inovativnost i izvrsnost koji su ključni za razvoj i napredak.

Zagreb, 6. rujna 2017.

Urednik



Prof.dr.sc. **Stjepan Lakušić**

Sadržaj

Predgovor	5
Procjena rizika podlokavanja mostova u uvjetima klimatskih promjena Ivan Čosić, prof.dr.sc. Neven Kuspilić	9
Prijenos sile kroz zrnati materijal Vedran Pavlič, prof.dr.sc. Tomislav Ivšić	19
Alkalno-aktivirani materijali ojačani prirodnim vlaknima Bojan Poletanović, dr.sc. Merta Ildiko, prof.dr.sc. Andreas Kolbitsch	29
Numerički modeli izdvojene ploče i grede inženjerskih konstrukcija Karlo Kopljar, prof.dr.sc. Mladen Meštrović	39
Pojačanja nearmiranog žiđa na posmik tkaninom armiranim mortovima (TRM) Martina Carić, izv. prof.dr.sc. Tomislav Kišiček	49
Analiza seizmičkog opterećenja ispune silosa prema Eurocodu 8 Zlatko Belošević, prof.dr.sc. Mladen Meštrović	61
Pregled i analiza dosadašnjih modela integracije sustava BIM i ERP Sonja Kolarić, izv.prof.dr.sc. Mladen Vukomanović	71
Pregled i analiza područja upravljanja interesnim sudionicima u velikim građevinskim projektima Kristijan Robert Prebanić, doc.dr.sc. Ivana Burcar Dunović	83
Praćenje i kontrola produktivnosti građevinske mehanizacije integracijom bežičnih tehnologija Martina Šopić, izv.prof.dr.sc. Mladen Vukomanović	95
Sprječavanje štetnih posljedica lutajućih struja na kolosiječne konstrukcije Katarina Vranešić, prof.dr.sc. Stjepan Lakušić	105
Primjena programskoga paketa Abaqus u znanstvenom radu na Građevinskom fakultetu u Zagrebu doc.dr.sc. Mario Uroš, izv.prof.dr.sc. Davor Skejić, dr.sc. Krunoslav Pavković, dr.sc. Ivan Lukačević	117
Važnost međunarodne suradnje u znanstvenim istraživanjima doc.dr.sc. Marijana Serdar	131
Sažeci obranjenih doktorskih radova: 2016. - srpanj 2017.	133

Procjena rizika podlokavanja mostova u uvjetima klimatskih promjena

Ivan Ćosić¹, prof.dr.sc. Neven Kuspilić²

¹ Geokon-Zagreb d.d., ivan.cosic@geokon.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, kuspa@grad.hr

Sažetak

Mostovi su za svog projektnog vijeka izloženi promjenama u koritu vodotoka nastalih kao posljedica prirodnih erozijskih procesa uvjetovanih režimom tečenja. Promjene klime utječu na promjenu hidrološko-hidrauličkog režima vodotoka. Proces podlokavanja u izravnoj je ovisnosti o režimu tečenja i hidrauličkim parametrima toka vodotoka. Razvojem podlokavanja narušava se funkcionalnost i sigurnost mosta, što može dovesti do šteta i urušavanja. U ovom radu promatrana je veza klimatskih promjena, procesa podlokavanja i rizika podlokavanja koji bi određene klimatske promjene mogle prouzročiti.

Gljučne riječi: podlokavanje oko mostova, rizik od podlokavanja, klimatski modeli, lokalna erozija, modeli rizika

Bridge scour risk assessment in climate change conditions

Abstract

During their design life bridges are exposed to riverbed changes, which are caused by natural erosion processes influenced by variable flow regime conditions. Climate changes influence hydrological conditions at the river basin and hydraulic parameters of flow, which are directly linked to scour development processes. Scour leads to bridge instability, which can result in bridge damage and failure. The goal of this paper is to show the relationship between the climate change, bridge scour, and the effects of climate change on scour risk.

Key words: bridge scour, scour risk, climate change, risk models, climate models

1 Uvod

Klimatske promjene, na neizravan način, u određenoj mjeri utječu na erozijske procese u vodotocima, djelujući na hidrološki režim vodotoka. Povećanjem količina oborina povećava se otjecanje na slivu, što u konačnici rezultira većim vodostajima i protocima vodotoka. Isto tako, smanjenjem količine oborina dolazi do smanjenja razina vodostaja i protoka u vodotoku. U uvjetima velikovodnih događaja hidraulički parametri toka, brzina i turbulencija imaju veće vrijednosti, te je erozivno djelovanje vodotoka veće. Pojava lokalne erozije stupova mosta i upornjaka, proces podlokavanja, u izravnoj je korelaciji s parametrima toka te u konačnici i s hidrološkim prilikama vodotoka. Same građevine na vodotocima, ponajprije mostovi, projektirane su kako bi bile otporne na djelovanje vode, međutim njihova stabilnost, u projektnom vijeku građevine, može biti ugrožena zbog erozijskih procesa u koritu vodotoka. Budući da je projektni vijek građevine poput mosta i preko 100 godina, u navedenom razdoblju mogu se očekivati značajnije promjene početnih projektnih uvjeta, poput promjene dubine korita, ali i promjene klime te time i hidrološkoga režima vodotoka. Dubina za koju se snizi razina dna korita ispod svoga prirodnog stanja naziva se dubina erozije, odnosno u slučaju podlokavanja, dubina podlokavanja [1]. Brojna istraživanja provedena u Sjedinjenim Američkim Državama pokazuju kako je podlokavanje primarni uzročnik otkazivanja mosne konstrukcije, s prosječnom godišnjom stopom od 22 mosta koja su urušena ili zatvorena zbog znatnih deformacija [2]. Uzimajući u obzir sve veći značaj mostova i prateće infrastrukture u današnjem društvu, primijenjen je model rizika kako bi se procijenilo stanje ugroze u ekonomskom pogledu. U ovom radu nastojat će se povezati aktualne klimatske promjene s procesom podlokavanja te predstaviti modele procjene rizika podlokavanja u uvjetima tih promjena. Uzimajući u obzir aktualne klimatske modele koji iskazuju promjene klime, vezujući ih s metodama proračuna podlokavanja i vjerojatnošću pojave hidroloških događaja određenih povratnih perioda, nastojat će se procijeniti utjecaj tih promjena na rizik podlokavanja u novim klimatskim uvjetima. Ovaj rad predstavlja samo pregled i prijedlog moguće metodologije povezivanja navedenih pojava i procesa te u daljnjim radovima zahtijeva konkretnije povezivanje klimatskih promjena i njihovoga utjecaja na rizik od podlokavanja mostova.

2 Stanje znanja – pregled istraživanja

2.1 Postojeći klimatski modeli

Atmosfera je fluid u kojem vladaju fizikalni zakoni hidrodinamike i termodinamike, koji se mogu opisati matematičkim nelinearnim diferencijalnim jednadžbama [3]. Sustav tih diferencijalnih jednadžbi predstavlja klimatski model. Klimatski se modeli općenito dijele na globalne i regionalne. Globalni klimatski modeli (eng. *Global Climate Model*

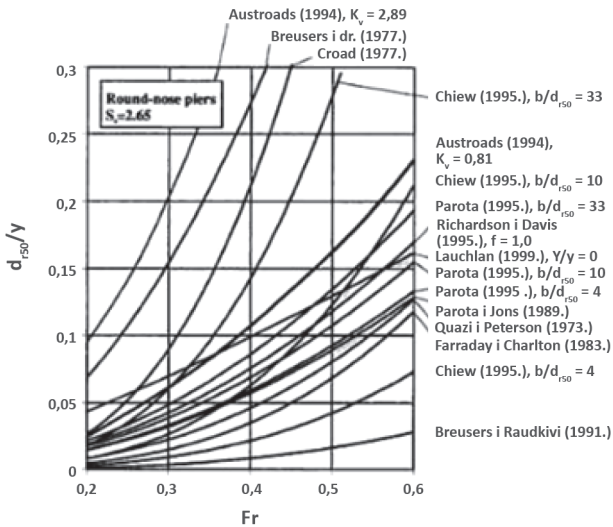
- GCM) prate klimu i promjene klime na globalnoj razini te daju rubne uvjete manjim, regionalnim modelima (eng. *Regional Climate Model* - RCM). Zbog razmjerno grube rezolucije (150 - 250 km) GCM su neprikladni za istraživanje klime i klimatskih varijacija na lokalnim i regionalnim skalama [4]. Regionalni klimatski modeli (RCM) pokrivaju manje područje te su finije horizontalne rezolucije (10 - 50 km), čime se omogućavaju detaljniji izračuni klimatskih parametara [5]. Uz klimatske modele, za simulacije klime u bliskoj budućnosti nužno je odabrati i klimatske scenarije, što uglavnom podrazumijeva scenarije emisije stakleničkih plinova, uzimajući u obzir pretpostavke o budućem gospodarskom, demografskom, socijalnom i tehnološkom razvoju na globalnoj i regionalnoj razini. U ovom se radu neće ulaziti u samu problematiku klimatskih modela, nego će se za razmatranja rabiti podaci dobiveni iz aktualnih klimatskih modela.

2.2 Metodologije proračuna podlokavanja

Problem lokalnoga podlokavanja stupova i upornjaka mosta znatno se proučavao u proteklom stoljeću te su objavljene brojne publikacije na tu temu. Većinom su to provedena ispitivanja na laboratorijskim modelima, pa su podaci, izrazi i veličine odgovarajuće empirijskim podacima koje je određeni postupak proučavanja pokazao. U praksi, proces podlokavanja, kao i sva problematika vezana za pronos nanosa, teško je mjerljiv, što je vidljivo iz izraza za proračun dubina podlokavanja, a posebice pri dimenzioniranju zaštite od podlokavanja, kada raspon dobivenih vrijednosti može znatno odstupati. Proteklih nekoliko desetljeća, objavljeni su brojni značajni radovi na temu lokalnog podlokavanja [6]. Pregled izraza dan je u tablici 1.

Tablica 1. Pregled nekih od metoda i formula za izračun dubine podlokavanja (y) ili potrebnog promjera zrna zaštite od podlokavanja (d_{r50})

Metoda	Formula	Izraz
Quazi i Peterson (1973.)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{0,85}{(S_s - 1)^{1,25}} Fr^{2,5} \text{ [cm]}$	(1)
Breusers i dr. (1977.)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{2,83}{(S_s - 1)} Fr^2 \text{ [cm]}$	(2)
Farraday i Charlton (1983.)	$\frac{d_{r50}}{y} = 0,547 Fr^3 \text{ [cm]}$	(3)
Breusers i Raudkivi (1991.)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{0,278}{(S_s - 1)^{1,5}} Fr^2 \text{ [cm]}$	(4)
Austroads (1994.)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{0,58 K_p K_v}{(S_s - 1)^{1,5}} Fr^2 \text{ [cm]}$	(5)
Legenda: y – dubina podlokavanja [m], d_{r50} – srednje zrno obloge [mm], S_s – specifična težina kamena za riprap, Fr – Froudeov broj, K_p – faktor oblika stupa, K_v – faktor brzine toka		



Slika 1. Usporedba rezultata metoda određivanja zrna zaštitne riprap obloge [6]

Prema slici 1., vidljiv je znatan raspon mogućih rezultata, barem prema izrazima (1) – (5); uočljivo je kako su veličine koje se rabe u proračunu iste, a i sam je oblik izraza gotovo istovjetan, no pripadajuće konstante daju drugačije rezultate. Metoda (jednadžbe) koje se rabe za proračun su brojne. Najčešće upotrebljavane metode za proračun dubine podlokavanja oko stupova mosta jesu CSU metoda (Colorado State University) te Froehlichova metoda, dok se za upornjake najčešće rabe Froehlichova metoda s nešto drugačijim izrazom nego za stupove te metoda HIRE (FHWA 2001 – Federal Highway Administration, SAD) [7].

2.3 Modeli rizika

Općenita definicija rizika u hidrološkom smislu iz Direktive 2007/60/EZ (Europski parlament i Vijeće, 2007) Europskoga parlamenta i vijeća definira poplavni rizik kao umnožak vjerojatnosti pojave, njezine učestalosti i štete koju ta pojava uzrokuje. To znači da je poplavni rizik ekonomska kategorija, odnosno da je jedinica mjere novčana [8]. Isto načelo definicije rizika može se primijeniti i na rizik od podlokavanja. Matematički gledano, rizik je definiran kao [9, 10]

$$\text{Rizik} = P_e(\text{PP}) \cdot \text{NSV} \quad (6)$$

gdje su:

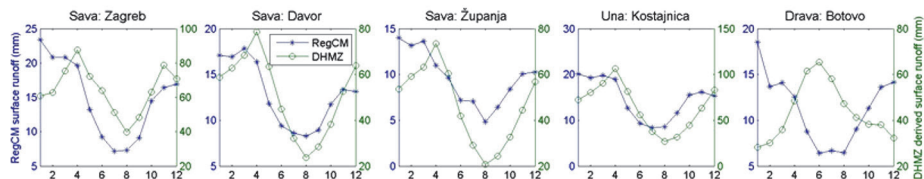
$P_e(\text{PP})$ – vjerojatnost pojave određenoga projektnog povratnog perioda

NSV – neto sadašnja vrijednost troškova gubitka stabilnosti (tj. suma troškova ponovne izgradnje, oštećenja,...).

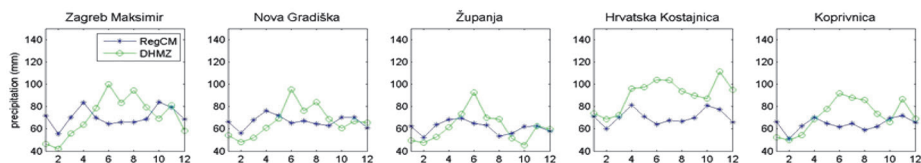
Iz područja procjene rizika na temelju izraza (6) razvijeni su brojni modeli prilagođeni pojedinim problemima kako bi što bolje opisali faktore rizika za promatrana područja, poput rizika od poplava, od urušavanja, od terorističkih akcija te brojni drugi. Za područje procjene rizika od podlokavanja srodni modeli rizika su modeli poplavnih rizika, budući da se promatra vrijednost vjerojatnosti pojave određenih hidroloških događaja, dok je neto sadašnja vrijednost nešto drugačija, te se ona u modelima rizika od podlokavanja odnosi na most kao građevinu te promet i infrastrukturu koja je vezana na promatrani most.

3 Korelacija procesa podlokavanja i klimatskih promjena

U Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ-u) radilo se na razvoju regionalnoga klimatskog modela RegCM3 kojim se simulira sadašnja klima, u razdoblju od 1961. - 1990. godine te klima u bliskoj budućnosti, u razdoblju 2011. - 2040. godine [11]. Rezultati regionalnoga klimatskog modela upotrijebljenog za domenu iznad Europe utemeljeni su na rubnim uvjetima globalnog klimatskog modela EHSOM. Za simulaciju buduće klime upotrijebljen je IPCC klimatski scenarij A2, koji je izrazito nepovoljan, koji uključuje visoke koncentracije stakleničkih plinova i karakterizira svijet velike heterogenosti sa stalnim povećanjem svjetske populacije [12]. Rezultati toga modela pokazuju povećanje količina oborina i otjecanja u jesenskom periodu, naročito na području istočne Hrvatske.



Slika 2. Usporedni prikaz površinskoga otjecanja za mjerene podatke (zeleno, linija s kružićima) i rezultate simulacije modela (plavo, linija s točkama)



Slika 3. Usporedni prikaz količina oborina za mjerene podatke (zeleno, linija s kružićima) i rezultate simulacije modela (plavo, linija s točkama)

Ono što povezuje klimatske modele i proces podlokavanja upravo su vodostaj i protok, odnosno brzina tečenja, za određeni hidrološki događaj. To je vidljivo iz izraza za proračun podlokavanja oko stupa mosta, prema CSU metodi, koju upotrebljava i FHWA, u priručniku HEC-18 [7]:

$$\frac{y}{y_1} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left[\frac{b}{y_1} \right]^{-0.65} Fr^{0.43} \quad (7)$$

gdje su:

y – dubina podlokavanja [m]

y_1 – dubina u profilu uzvodno od stupa mosta [m]

b – širina stupa [m]

Fr – Froudeov broj, $Fr = \frac{v_{sr}^2}{gy_1}$

v_{sr} – srednja brzina uzvodno [m/s], $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

K_1, K_2, K_3, K_4 – faktori korekcije

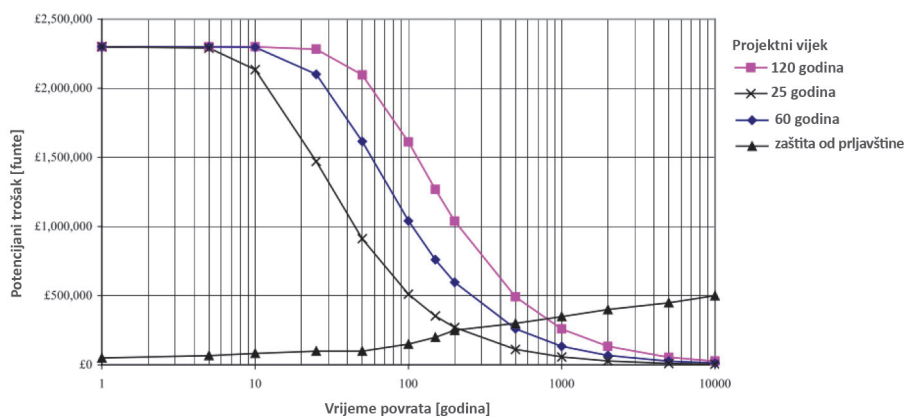
Najveći učinak podlokavanja događa se za vrijeme velikovodnih događaja, kada su brzine i vodostaji najveći, a time je i djelovanje vode na pokretanje čestica nanosa također najveće te je proces erozije najizraženiji. Za svaki specifičan slučaj nužno je odrediti koje vodostaje i protoke trebamo promatrati. Statističkom analizom zapisa hidroloških podataka određuju se hidrološki događaji određenih povratnih perioda, s pripadajućom vjerojatnošću pojavljivanja. Primjenjujući upravo simulacije klimatskih modela treba analizirati simulirane vodostaje i protoke za buduće razdoblje kako bi se moglo na temelju tako dobivenih značajnih vodostaja i protoka odrediti dubine podlokavanja, a u konačnici i odgovarajući rizik.

4 Analiza modela rizika

Prema izrazu (6), rizik predstavlja kombinaciju vjerojatnosti pojavljivanja događaja određenoga povratnog perioda i vrijednosti štete koju taj događaj uzrokuje. Kako bi se moglo pristupiti izračunu rizika, nužno je odrediti vjerojatnosti pojavljivanja određenih događaja. Za to postoji više statističkih postupaka. Ipak, za procjenu rizika od podlokavanja nije dovoljno samo odrediti vjerojatnost pojave određenoga hidrološkog događaja, nego taj podatak dovesti u korelaciju s odabranim ili postojećim projektnim vijekom građevine, kako bi procjena tog rizika imala smisla [8]. Upotreba optimalnoga povratnog razdoblja za projektiranje zaštite od podlokavanja može se dobiti kombiniranjem vrijednosti povratnoga perioda za projektiranje zaštite od podlokavanja s vrijednošću štete za pojedino vrijeme projektnoga vijeka građevine. Za odabrani projektirani vijek građevine nužno je odrediti vrijednosti povratnih perioda projektirane zaštite s odgovarajućim troškovima. Kada se te dvije krivulje prikažu na zajedničkom grafu, na mjestu njihovog presjecišta očitao bi se optimalan povratni period za dimenzioniranje zaštite od podlokavanja [10], kako je prikazano na slici 4.

Tablica 2. Vjerojatnost pojave događaja projektnog povratnog perioda jednom u vremenu projektnog vijeka uporabe građevine [8]

Projektni povratni period [god]	Projektni vijek uporabe građevine [god]						
	2	10	50	100	200	500	1000
2	0,750	0,999	1	1	1	1	1
10	0,190	0,651	0,995	1	1	1	1
50	0,040	0,183	0,636	0,867	0,982	0,999	0,999
100	0,020	0,096	0,395	0,634	0,866	0,993	0,999
200	0,010	0,049	0,222	0,394	0,633	0,918	0,993
500	0,004	0,020	0,095	0,181	0,330	0,632	0,865
1000	0,002	0,010	0,049	0,095	0,181	0,394	0,632



Slika 4. Odnos rizika rušenja prema cijeni zaštite od podlokavanja [10]

Povećavajući odabrani projektni vijek građevine, povećavamo i vjerojatnost pojave kritičnoga hidrološkog događaja, što u konačnici dovodi do zaključka kako je nužno razmotriti ekonomske dobiti ili gubitke u pogledu dimenzioniranja zaštite od podlokavanja u odnosu na možebitnu štetu do koje bi došlo ako te zaštite ne bi bilo. Za izračun samoga rizika od podlokavanja FHWA rabi HYRISK, računalni program koji se bazira na podacima iz baze mostova, u kojoj su sadržani svi podaci o pojedinom mostu, njegovo prometno opterećenje, ugroženost od podlokavanja, dubina i položaj temelja te brojni drugi parametri:

$$R = KP_A \left\{ (C_1 W L_b M) + (C_2 D A d) + \left[C_3 O \left(1 - \frac{T}{100} \right) + C_4 \frac{T}{100} \right] \frac{D A d}{S} \right\} \quad (8)$$

gdje su:

- R – rizik [US \$]
- K – faktor korekcije
- P_A – godišnja vjerojatnost otkazivanja zbog podlokavanja [1/god]
- C_1 – troškovi obnove
- W – širina rasponske konstrukcije [m]
- L_b – duljina mosta [m]
- M – multiplikator cijene zamjene mosta
- C_2 – jedinična cijena vozila [US \$/km]
- D – duljina obilaska [m]
- A – prosječan broj vozila dnevno [vozilo/dan]
- d – trajanje obilaska [dan]
- C_3 – jedinična cijena vremena po čovjeku [US \$/h]
- O – broj putnika po vozilu [osoba/vozilu]
- T – prosječni dnevni udio kamiona [%]
- C_4 – jedinična cijena po kamionu [US \$/h]
- S – prosječna brzina na obilasku [km/h].

Na temelju podataka iz baze mostova, računa se rizik od podlokavanja koji predstavlja kombinaciju korektivnih faktora, godišnje vjerojatnosti otkazivanja na podlokavanje te cijene, koja uključuje stavke troškova sanacije i rekonstrukcije, troškova održavanja, vremenskih troškova zastoja te u najgorem scenariju trošak, odnosno cijenu ljudskih života [13, 14]. Kako bi se mogao izračunati rizik od podlokavanja po ovoj metodi, potrebno je poznavati brojne parametre i napraviti opsežne i sustavne analize mostova, a ne samo hidroloških događaja.

5 Zaključak i rasprava

U ovom radu prikazani su odnosi klimatskih modela kojima se simuliraju klimatske promjene, procesa podlokavanja te rizika podlokavanja za mostove. Promjene klime su općeprihvaćena činjenica. Smjer promjene klime, a time i njezinih hidroloških parametara, ovisi o modelu klime koji se promatra, tako da te promjene mogu biti u smjeru povećanja ili smanjenja oborina, ovisno i o prostornom području koje se razmatra. Za područje Republike Hrvatske, poglavito sliv rijeke Save, uočljive su određene promjene u hidrološkim ciklusima, sa sve češćim pojavama vodnih ekstrema. Kako bi na te izazove mogli adekvatno odgovoriti, nužno je uzeti u obzir te promjene i inkorporirati ih u poznate i priznate modele proračuna dubina podlokavanja te izračuna modela rizika od podlokavanja. Sam proces podlokavanja, kako je

spomenuto, najznačajniji je faktor ugroze mostova na vodotocima, a samim time što se odvija pod vodom i najizraženiji je za vrijeme velikovodnih događaja, nije ga jednostavno mjeriti i kontinuirano pratiti. Uzevši u obzir modele rizika, taj bi se problem trebao aktualizirati te u određenu ruku i racionalizirati. Naime, provedbom cjelokupne analize rizika mostova na podlokavanje, određen je i redosljed i prioritetnost, ali i cijena određenih djelovanja kako bi mostovi zadržali svoju funkcionalnost i uporabivost. Prilikom analize rizika od podlokavanja, ključno je odabrati povratni period za koji podlokavanje ima najizraženiju vrijednost te na taj povratni period dimenzionirati zaštitu. Kao zaključak na ovaj rad nameće se potreba za aktualiziranjem pitanja podlokavanja oko mostova, za sustavan i cjelovit pristup kako bi se sve eventualne štete, izazvane klimatskim promjenama, umanjile ili izbjegle.

Literatura

- [1] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D.: Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova; Influence of riverbed degradation on bridge safety, *Sabor Hrvatskih graditelja 2012.*, pp. 795–806, 2012.
- [2] Briaud, J.L., Gardoni, P., Yao, C.: Statistical, Risk, and Reliability Analyses of Bridge Scour, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 140 (2014) 2, 04013011
- [3] Branković, Č.: Klima i klimatske promjene, *Matematičko-fizički list*, 3 (2015), pp. 152–162.
- [4] Branković, Č., Srnec, L., Patar, M., Güttler, I.: Klimatsko modeliranje u DHMZ-u, Hrvatsko meteorološko društvo, Zagreb, 2014.
- [5] Güttler, I.: Očekivani scenariji klimatskih promjena na području istočne Slavonije, *CroAdapt radionica: Istočna Slavonija kao model regija*, 2015.
- [6] Bruce W. Melville, S.E.C.: *Bridge Scour*. Water Resources Publications LLC, 2000.
- [7] Department of Transport and Main Roads - Queensland Government Australia, *Bridge Scour Manual*, 2003.
- [8] Kuspilić, N., Gilja, G., Ocvirk, E.: Izračun vjerojatnosti pojave poplavnog događaja i njegovog utjecaja na poplavni rizik, *Hrvatske vode na investicijskom valu - 6. Hrvatska Konferencija o vodama*, pp. 584–592, 2015.
- [9] Kuspilić, N.: Postupci zaštite od voda - skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [10] Mockett, I.D., Simm, J.: *Risk Levels in Coastal and River Engineering: A Guidance Framework for Design*, E14 4JD. London: Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd, 2002.

- [11] Trninić, D., Bošnjak, T.: Dugoročne promjene prosječnih godišnjih protoka, *Hrvatske vode*, 80 (2012), pp. 223–230.
- [12] Güttler, I., Trninić, D., Bošnjak, T., Srnec, L., Patarčić, M., Branković, Č.: Potential near future runoff changes in Croatia, *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena/ Croatian waters facing the challenge of climate changes*, 2011, pp. 65–75.
- [13] Yanmaz, A.M., Apaydin, M.: Bridge Scour Risk Assessment and Countermeasure Design, *J. Perform. Constr. Facil.*, 26 (2012) 4, pp. 499–506.
- [14] Khelifa, A., Garrow, L.A., Higgins, M.J., Meyer, M.D.: Impacts of Climate Change on Scour-Vulnerable Bridges: Assessment Based on HYRISK, *J. Infrastruct. Syst.*, 19 (2013) 2, pp. 138–146.

Prijenos sile kroz zrnati materijal

Vedran Pavlič¹, prof.dr.sc. Tomislav Ivšić²

¹ Nikole Tesle 49, Malinska, vedran.pavlic@gmail.com

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

Sažetak

U radu se daje pregled spoznaja o prijenosu sile i modeliranju lanaca sile u zrnatu materijalu. Lanci sile imaju ključnu ulogu kao mehanizam prijenosa sile u zrnatu materijalu i određuju mehanička svojstva materijala (stabilnost, elastičnost i protočnost). Oni predstavljaju početnu točku u proučavanju vremenski i prostorno ovisnih procesa koji su raspravljani u tekstu. Formiranje i razvoj lanaca sile u sustavu zrna i šupljina predstavlja glavni problem istraživanja. Problem je moguće riješiti primjenom numeričke metode diskretnih elemenata i usporedbom s laboratorijskim ispitivanjima.

Ključne riječi: zrnati materijali, pijesak, bimodalna raspodjela sile, lanci sile, izvijanje, diskretan numerički model

Force transmission through granular material

Abstract

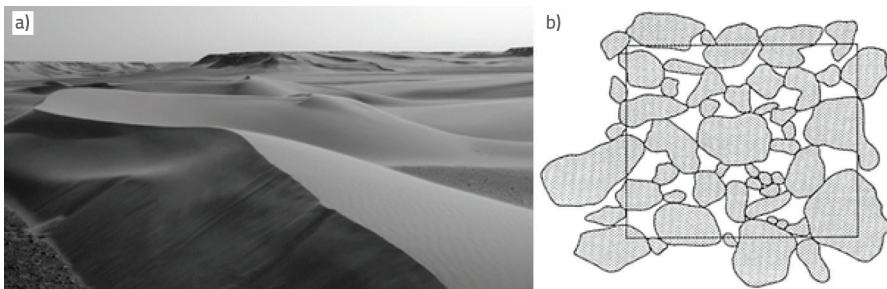
An overview of knowledge related to force transmission and modeling of force chains in granular material is presented in the paper. Force chains play a key role as the mechanism of force transfer in granular material, while also determining mechanical properties of the material (stability, elasticity and flow). They represent the starting point in the study of the time and space dependent processes discussed in this paper. The formation and development of force chains in the system of grains and voids constitutes the main issue of the research. This issue can be solved through numerical method of discrete elements and comparison with laboratory tests.

Key words: granular materials, sand, bimodal force transmission, force chains, buckling, discrete numerical model

1 Uvod

Zrnatije materijal nakupina diskretnih, čvrstih zrna promjera većega od 100 μm i šupljina između njih. Navedena veličina, prema geotehničkom kriteriju, predstavlja granicu između zrnatoga materijala i praha. Gornja granica veličine zrna nije određena. Primjeri su zrnatoga materijala pijesak, šljunak, riža, ljuske lješnjaka, blokovi leda, itd.

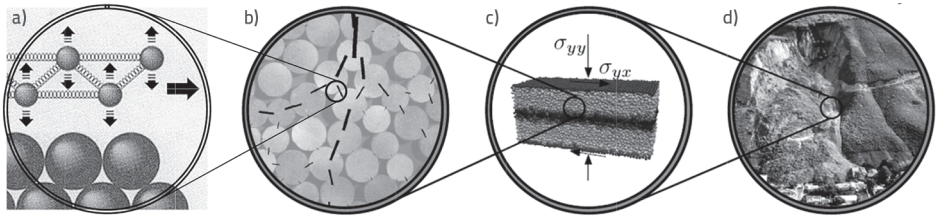
U radu je izdvojen pijesak kao tipičan primjer nakupine zrnatoga materijala. Bitna su svojstva pijeska stupanj zbijenosti i lokalni efekti premoštenja i uklještanja zrna. Stupanj zbijenosti ovisi o načinu taloženja, obliku i organizaciji zrna te granulometrijskom sastavu. O vrsti opterećenja (statičko, dinamičko) ovisi utjecaj lokalnih efekata na mehanički odziv pijeska. Navedene ovisnosti čine pijesak složenim materijalom za proučavanje.



Slika 1. Primjer zrnatog materijala: a) pješčane dine [1], b) skica strukture pijeska [2]

Složeno mehaničko ponašanje pijeska ovisi i o veličini (eng. *scale dependence*), tj. mjerilu promatranja i povezanosti varijabli svojstava materijala i mjerila. Za različite razine problema koji rješavamo biramo mjerilo i ključne parametre za modeliranje pijeska. Istraživanje za doktorski rad usredotočit će se na definiranje kontrolnih mehanizama ponašanja ciklički opterećenoga uzorka pijeska, ovisno o veličini amplitude ciklično - posmičnih deformacija. Kako bi se odredili kontrolni mehanizmi, istraživanje je podijeljeno na četiri mjerila promatranja, a konačan je cilj istraživanja povezivanje više razina mjerila.

- Na razini kontakta dva zrna ("nano" razina) istražuju se karakteristike kontakta i interakcije površine zrna, slika 1.a.
- Na "mikro" razini (niz od minimalno tri zrna) istražuju se ponašanje lanaca sile i stabilnost niza zrna, slika 1.b.
- "Mezo" razina (uzorak odviše milijuna zrna) je razina veličine uzorka u laboratorijskom ispitivanju tla, slika 1.c.
- Na "makro" razini (homogeni slojevi pijeska) analiziraju se realni geotehnički fenomeni i problemi, slika 1.d.



Slika 2. Mjerilo promatranja: a) "nano"razina [3], b) "mikro"razina [4], c) "mezo"razina [4], d) "makro"razina [4]

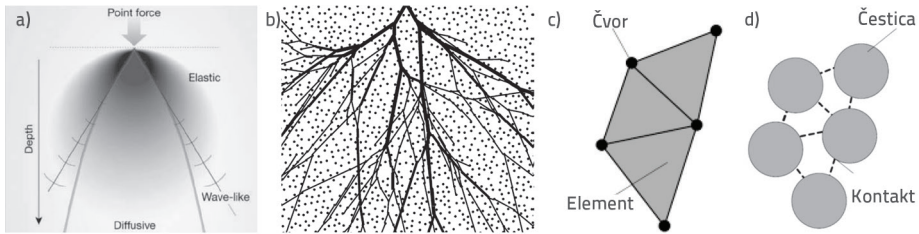
U ovom radu prikazuje se pijesak na mikro razina kojoj dominantan utjecaj na ponašanje materijala imaju lanci sile. Lanci sile predstavljaju mehanizam prijenosa sile kroz zrnati materijal i slabo su istraženi u odnosu na neke druge fenomene vezane uz gibanje zrna (npr. konvekcija, segregacija, grupiranje). Očekuje se da bi istraživanje lanaca sile trebalo omogućiti razumijevanje fenomena na realnoj makro razini, npr. dinamičkih fenomena, režima tečenja, blokiranja i podmazivanja zrnatoga toka, širenja valova, lavine, rasjeda i potresa.

2 Prijenos sile u zrnatu materijalu

Za predviđanje ponašanja tla danas se još uvijek ponajprije upotrebljava koncepcija kontinuuma. U kontinuumu materijal je konstantan u promatranj domeni. Analičkim modelom (konstitucijskim jednadžbama) uspostavlja se veza između deformacije i napreznja. Svakoj točki kontinuuma pridružuje se statistički makroskopski ekvivalent realnoga svojstva materijala. Koncepcija zanemaruje mikro parametre materijala, što za većinu problema na makro razini, npr. stabilnost kosina, nema utjecaja. Uobičajeni opisi prijenosa sile u zrnatu materijalu kao kontinuumu upućuju i na tri karakteristična problema koja se ne mogu zadovoljavajuće opisati tim modelom [5 - 7]:

- Silos ispunjen zrnatim materijalom - napreznje i dubina nisu linearno zavisni.
- Stožac pijeska na horizontalnoj podlozi - najveće napreznje nije u osi stošca.
- Točkasto opterećenje pijeska - postoji više načina širenja sile: difuzan (parabolična jednadžba), elastičan (eliptična jednadžba), putem valova (hiperbolična jednadžba).

Navedenim je istraživanjima zajedničko da nisu formirala jedinstvenu jednadžbu koja opisuje prijenos sile, primjenjuju kompleksne konstitucijske jednadžbe kako bi opisale ponašanje materijala i ne daju dobra rješenja za uočene probleme. Razlog je izrazita nehomogenost zrnatoga materijala (sustav zrna i šupljina) i izostavljanje relativnih pomaka i rotacija pojedinačnih zrna u modelima kontinuuma.



Slika 3. Prijenos sile u zrnatu materijalu: a) skica prijenosa sile u kontinuumu [5], b) skica prijenosa sile u diskontinuumu [6], c) modeliranje materijala u kontinuumu [7], d) modeliranje materijala u diskontinuumu [7]

Alternativa koncepciji kontinuum jest diskontinuum. U diskontinuumu se zrnati materijal sastoji od diskretnih elemenata (zrna) i šupljina (pora). Prijenos sile odvija se putem zrna, a ovisno o položaju zrna u sustavu razlikuje se i veličina sile koju prenose. Metode temeljene na diskontinuumu omogućavaju praćenje svakoga zrna pojedinačno (pomak, brzina), niza zrna (smjer i veličina kontaktnih sila), ali i uprosječenih vrijednosti naprezanja i deformacija u većem volumenu, npr. laboratorijskom uzorku. Naprezanje je mjera intenziteta sile definirana u koncepciji kontinuum i ne može se definirati na isti način u svakoj točki u diskontinuumu. Zbog toga se računa uprosječeno naprezanje unutar reprezentativnoga volumena diskretnog sustava. Postupkom uprosječivanja možemo povezati mikro razinu (diskontinuum) s mezo razinom (kontinuum). Analiziranjem pijeska kao diskretnoga sustava izdvojeni su pojedini faktori i njihov utjecaj na prijenos sile kako slijedi.

- Stanje naprezanja: pri izotropnoj kompresiji opterećenje se prenosi lancima sile koji nisu usmjereni i kratkoga su dometa; pri čistom posmiku lanci sile se usmjeravaju u smjeru glavnih naprezanja i dugoga su dometa.
- Vrsta opterećenja: ako dođe do nagle promjene smjera opterećenja (karakteristika cikličkih opterećenja), tj. nagle rotacije glavnih naprezanja, sustav bira novu grupu kontakata za prijenos sile.
- Granulometrijski sastav materijala: mješavina pijeska i praha u omjeru 70/30 predstavlja prijelaznu točku u kojoj zrna praha preuzimaju prijenos sile i razdvajaju zrna pijeska (zrna pijeska plivaju u prahu).
- Razmještaj i struktura zrna.

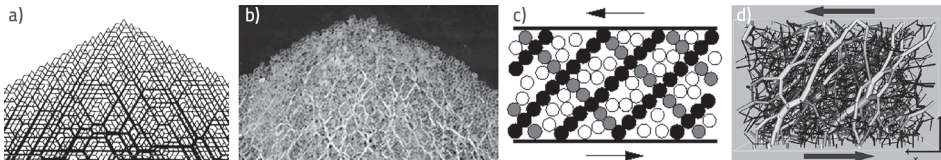
3 Lanci sile

Lanac sile je put kojim se prenose velika tlačna naprezanja u labirintu zrna i šupljina. Za razliku od mikenskoga labirinta u kojem se Tezej kreće "šupljinama", u geotehničkomu se labirintu sila prenosi zrnima koja su u kontaktu. Lanac sile čine najmanje tri zrna koja prenose opterećenje. Više lanaca sile formira prostornu mrežu prijenosa sile.

3.1 Vizualizacija lanaca sile

Uporabom valjaka od pleksiglasa (fotoelastičan materijal) i zrna od pireksa (vatros talno staklo) eksperimentalno je otkriveno postojanje lanaca sile, tj. lanaca prijenosa naprezanja (*des chainons de transmission de contraintes*), prema Dantu, 1968. [8]. Lanci sile opisani su kao izražene prostorne fluktuacije kontaktnih sila. Zbog ograničenja analitičkoga i fizičkog modela, kao osnovni se alat za praćenje stvaranja, širenja, izvijanja i pucanja lanaca sile primjenjuje numerički model, slika 4. U nastavku je dana numerička definicija lanca sile koja predstavlja početnu točku algoritma za izdvajanje i prikazivanje lanaca sile, prema Poschel i Schwager [9]. Lanci sile definirani su s tri uvjeta: zrna i , j te k se smatraju članovima istog lanca sile u sljedećem slučaju:

- zrna i , j te j , k susjedna su zrna,
- naprezanje koje djeluje na svako zrno prelazi određeni prag i
- linije spoja između i , j te j , k formiraju kut veći od 150° , tj. centri sva tri zrna gotovo su na istoj osi.



Slika 4. Vizualizacija lanaca sile: a) idealiziran numerički model (gravitacija) [10], b) fizički model (gravitacija) [11], c) idealiziran dvodimenzionalni prikaz (posmik) [12], d) numerički trodimenzionalni model (posmik) [13]

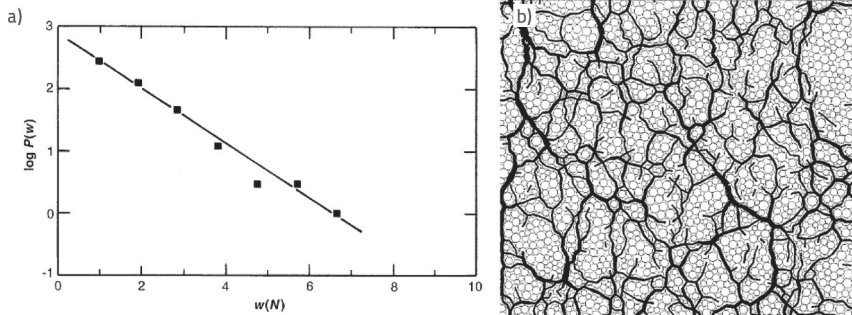
Algoritam u osnovi prikuplja informacije vezane za zrna u kontaktu (veličina kontaktne sile, položaj zrna) i filtrira ih. Identifikacija veličine i usmjerenja lanaca sile vizualizira se linijom koja povezuje centre zrna. Debljina linije proporcionalna je veličini kontaktne sile između dva zrna, slika 4. U trodimenzionalnom modelu umjesto linije rabi se valjak.

3.2 Distribucija lanaca sile

Prvi statistički model za predviđanje distribucije sila u zrnatom materijalu je q - model, Liu et all. [14]. Sile su predstavljene kao skalarne vrijednosti koje se šire od zrna do zrna uzduž mreže kontakata. Vjerojatnost pojave sile veće od njihove aritmetičke sredine (srednja sila) pokazuje eksponencijalnu zakonitost. Navedena zakonitost naznačuje da je pojava lanaca sile većega intenziteta rijetka.

Pomoću numeričkih simulacija Radjai et all. [15, 16] otkrili su bimodalno svojstvo raspodjele sila u zrnatom materijalu. Dvije mreže kontakata zrna međusobno se

nadopunjuju. Slaba mreža, koju čine kontakti koji prenose sile manje od srednje sile, i jaka mreža, koju čine kontakti koji prenose sile veće od srednje sile, pokazuju drukčije ponašanje. Slaba mreža mehanički se ponaša kao tekućina (ne prenosi posmična naprezanja), a jaka mreža kao skelet. Raspodjela jakih sila eksponencijalno se smanjuje, dok je raspodjela slabih sila jednolika, slika 5.



Slika 5. Prijenos sile u zrnati materijalu: a) vjerojatnost pojave sile $P(w)$ u ovisnosti o veličini sile w [14], b) bimodalna raspodjela sile (skica jake mreže) [15]

Navedeno pojednostavnjenje (samo dvije mreže kontakata) ne utječe na analizu prijenosa sile. Naime, lanci sile krući su u odnosu na ostatak materijala zarobljenog između njih. Krući element definira pomak, tj. ponašanje sustava, tako da lanci sile kontroliraju ponašanje pijeska. Lanci sile (jaka mreža) obuhvaćaju oko 40 % kontakata cijele mreže.

3.3 Stabilnost lanaca sile

Lanci sile formiraju se pri taloženju pijeska u mediju vode ili zraka pod utjecajem gravitacije. Ako na sustav ne djeluje dodatno vanjsko opterećenje, lanci sile su stabilni, tj. ne mijenjaju položaj i intenzitet u vremenu. Promjenom vanjskoga opterećenja lanci sile mogu postati nestabilni i mijenjati položaj i intenzitet u vremenu.

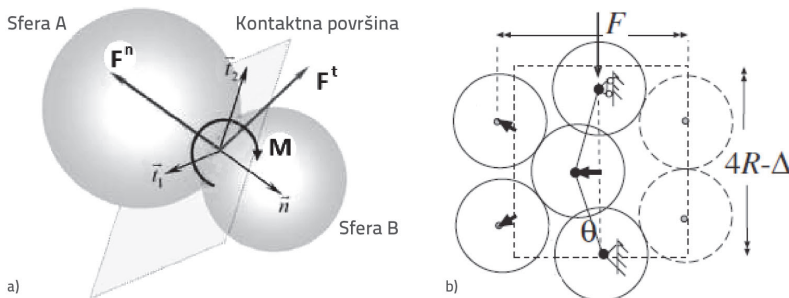
Razlikujemo stabilnost pojedinoga lanca sile i stabilnost sustava, tj. mreže lanaca sile. Stabilnost lanca sile ovisi o njegovoj duljini i karakteristikama zrna koja su njegovi članovi: čvrstoća zrna (otpor drobljenju), oblik zrna (otpor rotaciji) i materijal zrna (otpor klizanju). Za stabilnost sustava osim pojedinačne stabilnosti lanaca sile ključan je i stupanj zbijenosti materijala između njih (sposobnost bočne potpore da preuzme dodatno opterećenje).

U slučaju kada su pojedinačni lanci sile nestabilni, sustav svejedno može biti prilagodljiv i otporan. Navedeno je karakteristično za zbijene sustave, gdje se, zbog velikoga broja potencijalnih putova prijenosa sile, sila preusmjeri na novu grupu kontakata. Rahli sustavi s puno šupljina nemaju rezervnu mogućnost (potencijalno novu grupu kontakata) za prijenos sile te ovisi o uspostavljenim lancima sile. U tom

slučaju pucanje nekoliko lanaca sile može dovesti do lavine, urušavanja kompletnoga sustava ili imati zanemariv utjecaj, ovisno o njihovom položaju.

3.4 Modeliranje gubitka stabilnosti lanca sile

Lanci sile kao krući, vremenski i prostorno promjenjivi elementi kontroliraju mehaničko ponašanje i stabilnost zrnatoga materijala. Mehaničko ponašanje zrnatoga materijala modelira se numeričkom metodom *Discrete Element Method* (DEM) [17]. DEM uzima u obzir svako zrno pojedinačno, a gibanje zrna određeno je na osnovi međudnosa sa susjednim zrnima pomoću kružnog postupka proračuna. U kružnom postupku izmjenjuju se proračuni na kontaktu zrna (kontaktne sile i kontaktni moment) s proračunom gibanja zrna (pravocrtno i rotacijsko gibanje), vidi sliku 6. Postoji više načina proračuna sile i momenata između dva zrna u kontaktu [18, 19]. Mogu se odabrati različiti modeli za proračun kontaktne sile: linearni, Hertzov, histerezni, itd. Kontaktne momente može se proračunati na osnovi realnoga oblika zrna ili uporabom idealiziranog oblika zrna (sfera, disk) s dodanim momentom otpora rotaciji. Idealizirani moment otpora zamjenjuje nepravilan oblik, uklještenje i hrapavost zrna pomoću krutosti i relativne rotacije zrna.



Slika 6. Modeliranje: a) međudnosa zrna (F^n - kontaktne normalna sila, F^t - kontaktne tangencijalna sila, M - kontaktne momente) [19], b) lanca sile (F - vanjsko opterećenje, R - radijus zrna, Δ - pomak, θ - kut izvijanja) [20]

Rad Tordesillas i Muthuswamy [20] daje prvi dvodimenzionalni analitički model elastičnoga i plastičnog izvijanja lanca sile s bočnom potporom pri osnom tlačenju. Rad predstavlja trenutačno stanje znanja u tom području. U radu su uspoređeni rezultati analitičkoga i numeričkog modela. Kako bi se omogućila usporedba numeričkoga i analitičkog modela za izvijanje lanca sile odabran je linearni kontaktne sile i idealizirani kontaktne momente.

Do izvijanja lanca sile može doći zbog klizanja ili rotiranja između dva zrna na najopterećenijem dijelu lanca u trenutku prekoračenja komponente čvrstoće. Otpor izvijanju lanca sile pruža materijal zrna (trenje), oblik zrna (rotacija) i zbijenost

susjednih zrna (bočna potpora). Variranjem vrijednosti osnovnih parametara zrna određen je utjecaj na izvijanje. Model je lanca sile ravan "stup" sastavljen od tri sfere, a međudodnos zrna modeliran je mehaničkim modelima opruge i plastičnoga klizača, vidi sliku 6.

4 Zaključak

Zrnati materijali pri različitim tipovima opterećenja u svakodnevnim situacijama pokazuju širok raspon pojava koje treba adekvatno karakterizirati i modelirati radi predviđanja mehaničkoga ponašanja u inženjerskoj primjeni. Numerički opisi tih pojava na makroskopskoj razini uključuju složene nelinearne modele u okviru mehanike kontinuuma, a u novije se vrijeme numeričkim simulacijama nakupina zrna (npr. metodom diskretnih elemenata) pokušava dobiti uvid u "unutarnje" odnose raspodjele sila među zrnima pri prijenosu vanjskih opterećenja, te karakterizirati ključne elemente prijenosa sila i njihove distribucije u zrnatu tijelu.

Prijenos sila u uzorku zrnatoga materijala uključuje formiranje lanaca sile. Lanci sile su ograničeno stabilni te se pri promjeni opterećenja mijenja i njihova konfiguracija; posebice pri cikličnom opterećenju oni se formiraju, "ojačavaju" i degradiraju. Jedan lanac sile predstavlja niz jako opterećenih zrna, a više lanaca sile formira prostornu mrežu prijenosa sila. Lanci sila određuju mehanička svojstva pijeska: stabilnost (tvore potporne stupove), elastičnost (predstavljaju opruge ako nema izvijanja) i protočnost (blokiraju tok zrnatoga materijala pri ispuštanju).

Numeričkim simulacijama, prema Radjai [15, 16], uočena je bimodalna raspodjela sila. Bimodalnom raspodjelom sila u sustavu zrnatoga materijala određene su funkcije jake (lanci sile) i slabe (bočna potpora lancima sile) mreže. U članku je dan omjer kontakata koji čine jaku i slabu mrežu (40:60).

Razumijevanje izvijanja lanaca sile predstavlja zagonetku koju je potrebno riješiti, a sve kako bi se moglo predvidjeti ponašanje zrnatoga materijala. Problem predstavlja ograničenje fizičkoga (pri laboratorijskom ispitivanju nije moguće "zaviriti" u uzorak) i analitičkog (rabi se jednostavna organizacija, mali broj i pravilan oblik zrna) modela.

Usporedba dostupne literature pokazuje da u novije vrijeme nema bitnijih poboljšanja u modeliranju izvijanja lanaca sile. Kao moguće poboljšanje ističe se postupak kombiniranja DEM - a i laboratorijskoga ispitivanja, vidi [21]. Simulacije laboratorijskih pokusa prvi su korak u makroskopskoj verifikaciji numeričkih modela. Verificirani numerički model upotrebljava se tako da se identificirani elementi sustava na mikro razini povežu s ponašanjem realnoga tijela uzorka u kontroliranim uvjetima. Na taj se način mogu provjeriti različite hipoteze u istraživanju zrnatoga materijala. U budućem će se istraživanju na osnovi laboratorijskih rezultata kalibrirati numerički (DEM) model uzorka pijeska kako bi se prepoznali kontrolni mehanizmi ponašanja

zrnatoga materijala pobuđenog cikličkim posmičnim opterećenjem. Kontrolni mehanizmi ponašanja zrnatoga materijala ovise o amplitudi cikličke posmične deformacije, a jedan je od kontrolnih mehanizama i gubitak stabilnosti (izvijanje) lanaca sile.

U ovom su radu ponajprije opisani lanci sila, a cilj je doktorskoga istraživanja potvrditi pretpostavku procesa formiranja, ojačanja i degradacije lanaca sile, te odrediti prag između ojačanja i degradacije lanaca sile. Predvidivi koraci u tom procesu, koji će se modelirati i pratiti, jesu:

1. Formiranje uzorka ("taloženje", "konsolidacija") - lanci sile se formiraju dominantno u vertikalnom smjeru.
2. Smicanje (male amplitude) - povećava se čvrstoća lanaca sile i cijelog uzorka.
3. Smicanje (srednje amplitude) - promjena ponašanja, tj. prag između ojačanja i degradacije lanaca sile.
4. Smicanje (velike amplitude) - dolazi do izvijanja i pucanja lanaca sile te smanjenja čvrstoće uzorka, a nakon određenoga broja ciklusa dolazi do tečenja (sloma) uzorka.

Dosadašnja istraživanja obuhvatila su klasifikacijske pokuse ispitivanoga materijala, modeliranje pijeska s realnijim oblikom čestica i granulometrijskom krivuljom, razvoj numeričkoga modela laboratorijskog uređaja u kojem je provedeno ispitivanje, pisanje koda koji simulira konsolidaciju i smicanje uzorka pijeska te kalibraciju mikro - karakteristika pijeska na osnovi laboratorijskih pokusa [21].

Ekperimentalno i numeričko istraživanje složenoga mehaničkog ponašanja zrnatih materijala daje uvid u unutarnje mehanizme složenih makroskopskih pojava, te mogućnost njihova boljeg predviđanja u inženjerskim primjenama. Lanci sile trebaju biti početna točka u proučavanju složenih, vremenski i prostorno ovisnih procesa, npr. lavina, likvefakcija i odziv materijala pri potresu.

Literatura

- [1] Welland, M.: Sand: The Never - Ending Story, *University of California Press*, Berkeley 2010
- [2] Holtz, R.D., Kovacs, W.D.: An introduction to geotechnical engineering, *Prentice - Hall*, New Jersey, 1981
- [3] Krim, J.: Surface science and the atomic - scale origins of friction: what once was old is new again, *Surface Science*, 500 (2002), pp. 741 - 758.
- [4] Hurley, C.R.: Force chains, friction, and flow: Behavior of granular media across length scales, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, California, 2016

- [5] Luding, S.: Granular media: Information propagation, *Nature* 435 (2005), pp. 159 - 160.
- [6] Bouchaud, J., Claudin, P., Levine, D., Otto, M.: Force chain splitting in granular materials: A mechanism for large - scale pseudo - elastic behaviour, *European physical journal E*, 4 (2001), pp. 451 - 457.
- [7] O`Sullivan, C.: Particulate discrete element modelling: a geomechanics perspective, *Spon Press*, London and New York (2011).
- [8] Dantu, P.: Etude experimentale d`un milieu pulverulent: compris entre deux plans verticaux et paralleles, *Annales des ponts et chaussees*, 4 (1967), pp. 193 - 202.
- [9] Poschel, T., Schwager, T.: Computational granular dynamics /models and algorithms/. *Springer Verlag*, 2005
- [10] Luding, S.: Stress distribution in static two - dimensional granular model media in the absence of friction, *Physical review E*, 55 (1997) 4, pp. 4720 - 4729.
- [11] Krim, J., Behringer, R.P.: Friction, force chains and falling fruit, *Physics Today*, pp. 66 - 67, 2009
- [12] Cates, M.E., Wittmer, J.P., Bouchaud, J., Claudin, P.: Jamming, Force Chains and Fragile Matter, *Physical review letters*, 81 (1998) 9, pp. 1841 - 1844.
- [13] Mair, K., Hazzard, J.F.: Nature of stress accommodation in sheared granular material: Insights from 3D numerical modeling, *Earth and Planetary Science Letters*, 259 (2007), pp. 469 - 485.
- [14] Liu, C., Nagel, S.R., Schecter, D.A., Coppersmith, S.N., Majumdar, S., Narayan, O., Witten, T.A.: Force Fluctuations in Bed Packs, *Science*, 269 (1995) 5223, pp. 513 - 515.
- [15] Radjai, F., Wolf, D.E., Moreau, J.J.: Bimodal Character of Stress Transmission in Granular Packings, *Physical review letters*, 80 (1998) 1, pp. 61 - 64.
- [16] Radjai, F., Roux, S., Moreau, J.J.: Contact forces in a granular packing, *Chaos*, 9 (1999) 3, pp. 544 - 550.
- [17] Cundall, P.A., Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29 (1979) 1, pp. 47 - 65.
- [18] Itasca.: PFC Version 5.0 Documentation. Minneapolis (2014).
- [19] Kozicki, J., Donze, F.V.: YADE - OPEN DEM: an open - source software using a discrete element method to simulate granular material, *Engineering Computations*, 26 (2009) 7, pp. 786 - 805.
- [20] Tordesillas, A., Muthuswamy, M.: On the modeling of confined buckling of force chains, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 57 (2009), pp. 706 - 727.
- [21] Pavlic, V., Matesic, L., Kvasnicka, P.: Numerical modelling of the NGI - DSS test and cyclic threshold shear strain for degradation in sand, *Granular Matter*, 19 (2017) 37.

Alkalno-aktivirani materijali ojačani prirodnim vlaknima

Bojan Poletanović¹, dr.sc. **Merta Ildiko²**, prof.dr.sc. **Andreas Kolbitsch³**

¹ Tehničko sveučilište u Beču, Građevinski fakultet, Austrija, bojan.poletanovic@gmail.com

² Tehničko sveučilište u Beču, Građevinski fakultet, Austrija, ildiko.merta@tuwien.ac.at

³ Tehničko sveučilište u Beču, Građevinski fakultet, Austrija, andreas.kolbitsch@tuwien.ac.at

Sažetak

Područje istraživanja ovog rada alkalno-aktivirani materijali (AAM), kao materijali budućnosti u građevini. Uporabom upravo tih materijala može se ozbiljno utjecatina smanjenje ugljičnogadioksida, (CO₂) a istovremeno i pozitivno utjecati na poboljšanje trajnosti betona. Materijali na bazi cementa imaju veliku tlačnu čvrstoću, ali već pri manjim vlačnim naprezanjima zbog male otpornosti javljaju se pukotine, što rezultiramalom žilavosti. Armiranjem materijala na bazi cementakratkim prirodnim vlaknima može se ozbiljnije utjecati na ove nedostatke.

Ključne riječi: alkalno-aktivirani materijali, prirodna vlakna, konoplja, lan, trajnost materijala na bazi cementa

Alkali-activated materials strengthen with natural fibers

Abstract

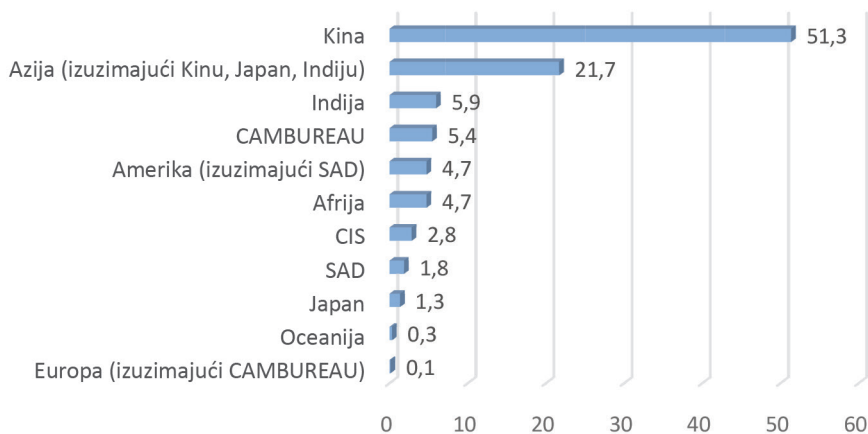
The scope of this research focuses on alkali-activated materials (AAM), as future building materials. The utilization of these materials can bring down carbon dioxide (CO₂) emissions considerably, and they also have a beneficial effect on concrete durability. Cement-based materials have a high compressive strength but – due to poor resistance - cracks occur already at small tensile stress values, which results in low toughness. The usage of the short natural fibre reinforcement can be highly efficient in combating such deficiencies.

Key words: alkali-activated materials, natural fibers, hemp, flax, durability of the cement-based materials

1 Razlog istraživanja u području alkalno-aktiviranih materijala

S obzirom na masu godišnje proizvedenog cementa, dolazi se do činjenice da je upravo cement proizvod koji se najviše proizvodi na Zemlji. Zajedno s agregatom i vodom čini glavne komponente betona. Današnja potreba za betonom procijenjena je na 4 tone po osobi na Zemlji [1]. Upravo zbog zahtjeva za nevjerojatno velikom količinom betona koji bi omogućio odgovarajući život sa zadovoljavajućom infrastrukturom, građevinama, mostovima i ostalim betonskim objektima, cement predstavlja glavni i vodeći materijal na svijetu. Njegova enormna proizvodnja, koja je u 2015. godini iznosila 4,6 milijarde tona [2], odgovorna je za velika zagađenja i velike količine CO₂ koje odlaze u atmosferu. Upravo je to bio razlog koji dovodi do ovoga istraživačkog rada koji će pomoći da se utječe na smanjenje emisije štetnih plinova u atmosferu i očuvanju okoliša.

Količina jedne tone proizvedenog cementa odgovorna je za skoro jednu tonu ugljičnog dioksida u atmosferi [3]. Predviđen rast proizvodnje cementa do 2025. godine ide i do nekoliko puta u odnosu na današnju proizvodnju [4]. Najveća se potreba za cementom očekuje u Aziji, gdje se i danas nalaze najveći proizvođači cementa (slika 1.).



Slika 1. Najveći proizvođači cementa u 2015. godini

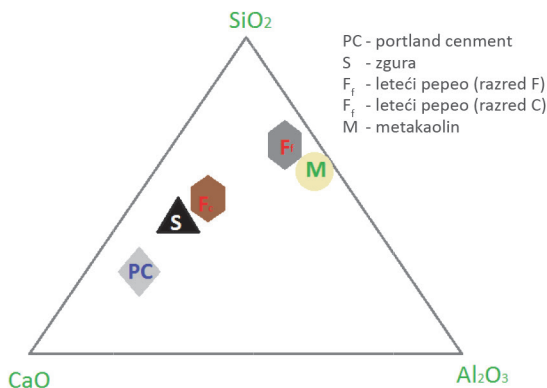
Danas je cement odgovoran za 5 - 10 % ukupne emisije ugljičnog dioksida na svijetu [5-8]. Tijekom proizvodnje cementa, vapnenac i glina moraju se zagrijati u pećima do približno 1450 °C. Da bi se postigla tolika temperatura, određena goriva moraju sagorjeti. Upravo je to sagorijevanje uzrok 40 % od ukupnog CO₂, koji zbog proizvodnje cementa dolazi u atmosferu i nažalost na ovu se količinu CO₂ ne može utjecati. Međutim, preostalih 60 % dolazi zbog kemijskoga razlaganja kalcijeva karbonata. Razlaganje kalcijeva karbonata prikazano je sljedećom, vrlo jednostavnom kemijskom reakcijom:



2 Sastav cementa

Približno 65 % sastava Portland cementa zauzima kalcijev oksid, čije je formiranje popraćeno emisijom ugljičnogdioksida. Pošto je cement uglavnom sastavljen od oksida, zgodno je da prilikom spominjanja elemenata u cementu pričamo upravo o njihovim oksidima. Dakle, kako bismo došli do smanjenja CO_2 emisije, prioritet bi trebalo biti smanjenje kalcijeva oksida. Promatrajući sve okside u cementu dolazi se do zaključka da su tri najbitnija: oksidi kalcija, silicija i aluminijska. Oksidi natrija i kalija previše su topljivi, dok oksidi željeza i magnezija imaju vrlo malu reaktivnost, pa je teško na njih utjecati. Stoga, kako je već ranije navedeno, oksidi kalcija, silicija i aluminijska predstavljaju najvažnije okside u cementu.

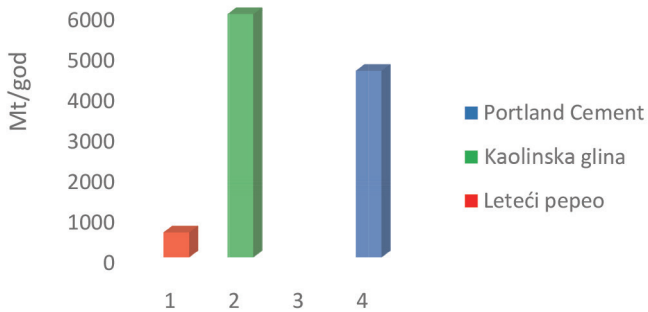
Takozvani alternativni cementni materijali (slika 2.), privukli su veliku pažnju širom svijeta. Mnogi materijali, (kao što su leteći pepeo, metakaolin, mikrosilika....) prepoznati su kao materijali koji već zamjenjuju dio klinkera kako bi na kraju došlo do smanjene CO_2 emisije. Osim značajnoga smanjenja emisije ugljičnog dioksida, uporabom materijala kao što su zamjenski cementni materijali dolazimo do očuvanja životne okoline i smanjivanja otpada.



Slika. 2. Pozicija alternativnih cementnih materijala u $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ dijagramu

3 Leteći pepeo

Međutim, postoji samo nekoliko materijala koji su dostupni u velikim i dovoljnim količinama (slika 3.). Među njima su leteći pepeo i kaolinska glina. Također, npr. uporaba letećega pepela dvostruka je prednost. S jedne strane, uporaba letećega pepela smanjuje emisiju ugljičnog dioksida, dok s druge ostavlja čišći okoliš. Mnoga istraživanja upućuju na vrlo uspješnu uporabu letećega pepela, u kojoj su postignuta dobra mehanička svojstva materijala kod alkalno-aktiviranoga materijala (AAM) [9-11].



Slika 3. Procjenjena dostupnost i količine materijala

Danas je najveći izvor energije sagorijevanje ugljena. Upravo sagorijevanje ugljena stvara pepeo, koji je obično skladišten na deponijama i veliki dio ostaje u obliku otpada. Leteći pepeo uglavnom sadrži silicij, aluminij, kalciji okside željeza. Svrstava se u dva razreda: razred C i razred F. Razred C je razred u kojemu suma silicija, aluminijski oksidi željeza predstavlja barem 50 % ukupne količine oksida, dok kod razreda F suma predstavlja 70 % ukupne količine oksida. Razred C sadrži minimalno 12 % kalcijevih oksida, dok razred F ima manje od 12 % oksida kalcija.

Jedan od budućih trendova svakako bi trebala efektivno uporaba letećega pepela u betonu. Prije mnogo godina cementna je industrija počela s djelomičnom zamjenom cementa letećim pepelom. Cilj ovog istraživanja je pokušaj zamjene cementa velikom količinom letećeg pepela ili čak s kompletnom zamjenom gdje je međutim prisutnost aktivatora neizbježna.

4 Alkalno-aktivirani materijali

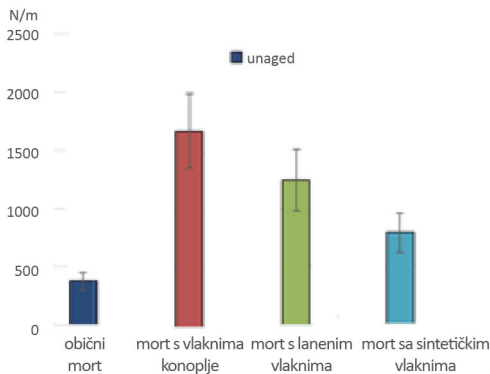
Jedan je od obećavajućih načina uporabe letećega pepela unutar AAM-a. Mnoga istraživanja pružaju dokaz sjajnih mehaničkih karakteristika AAM-a i mogućnost njihove primjene [12-14]. Prva uporaba AAM-a zabilježena je u Ukrajini 1970. godine. Uporaba AAM-a privukla je veliku pozornost protekloga desetljeća. Načelo uporabe je da materijali kao što su leteći pepeo, mikrosilika, metakaolin, kaolinska glina mogu sudjelovati zajedno s aktivatorima kao što su vodeno staklo, natrijum hidroksid biti aktivirani. Sve se odvija pod alkalnim "napadom" na amorfan alumino-silikat. Tako aktivirani materijali mogu posjedovati slične ili čak i bolje mehaničke karakteristike negoli materijali na bazi cementa. Alkalni cementi se mogu podijeliti u dvije glavne kategorije:

- kategorija u kojoj kao glavni produkt imamo C-A-S-H (kalcij-silikatno hidrantnu) strukturu koja je slična strukturi dobivenoj pri hidrataciji portland cementa;
- N-A-S-H (alkalno aluminijsko-silikatnu) strukturu, koji se nazivaju geo- ili neorganski polimeri. Naziv geopolimer prvi je upotrijebio Davidovits [15].

Uporabom geopolimera mogu se postići čak i bolje karakteristike nego s tradicionalnim materijalima na bazi cementa, manja emisija ugljičnoga dioksida i, ono što je veoma značajno, čišći okoliš. Uzimajući i vrlo nisku cijenu industrijskih nusprodukata, uporabom geopolimera može se također postići i ekonomska opravdanost. Geopolimeri omogućavaju i postizanje znatnih mehaničkih karakteristika materijala [16-18].

5 Prirodna vlakna

Općenito, beton je materijal koji ima široku primjenu upravo zbog njegove tlačne čvrstoće. Međutim, s druge strane, promatrajući otpornost na savijanje ne osigurava velike čvrstoće. Rana faza u kojoj dolazi do formiranja pukotina i mala količina absorbirane energije predstavljaju dio istraživanja na koji je planirano da se utječe armiranjem kratkim (oko 1 cm) prirodnim vlaknima. Iako vlakna bitno ne utječu na vlačnu čvrstoću, veliki doprinos daju pri odgađanju pojave prvih pukotina i osiguravaju znatno veću žilavost materijala. Najčešće rabljena vlakna u armiranju materijala na bazi cementa napravljena su od čelika, sintetike ili stakla. Upravo se ova vlakna mogu zamijeniti prirodnima, pri čemu se utječe na smanjenje emisije ugljičnoga dioksida, a zahtijevaju i manju količinu energije prilikom proizvodnje. Na slici 4. je prikazan doprinos prirodnih vlakana žilavosti materijala.

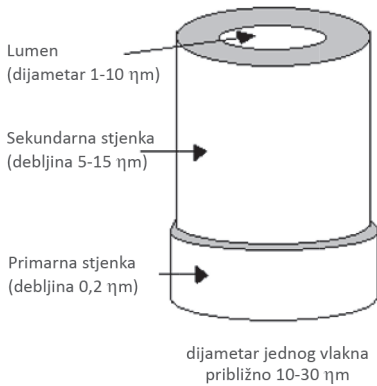


Slika 4. Žilavost morta s prirodnim vlaknima (konoplja, lan i sintetika) [19]

Prirodna vlakna kao što su konoplja, lan, vlakna kokosovog oraha, jute, itd. obećavajuća su vlakna pri armiranju materijala na bazi cementa [20-23]. Trenutačno postoje određeni problemi pri uporabi prirodnih vlakana. Da bi se savladale te prepreke treba posvetiti veliku pozornost sljedećim stvarima:

- trajnosti vlakana u alkalnomu okruženju
- pokušati standardizirati vlakna u ovisnosti o njihovim potrebama, koje se mijenjaju pri različitim žetvama, klimatskim zonama, vrstama tla na kojima se uzgajaju, uporabi pesticidima, itd.

- velikom upijanju vlage prirodnih vlakana. Vlakna konoplje i lana, koja su žarište ovoga istraživanja, napravljena su od dva vanjska sloja, primarnoga i sekundarnog, te unutrašnjega dijela - lumena (slika 5.).



Slika 5. Prikaz vlakna lana [1]

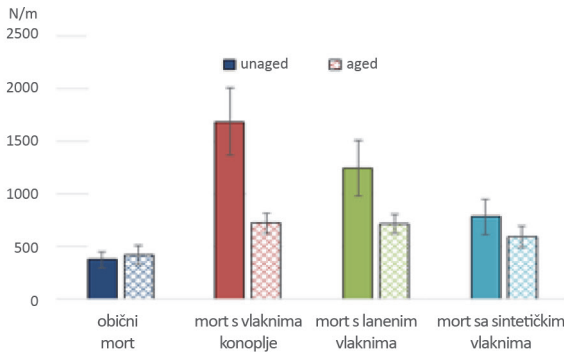
Prvi vanjski sloj ima funkciju zaštite sekundarnoga sloja, koji osigurava vlačnu čvrstoću vlakna. Lumen, unutrašnji dio, odgovoran je za upijanje vode kod vlakana. Osnovne karakteristike vlakna i njihove glavne komponente prikazane su u tablici 1., prema [24-25].

Tablica 1. Fizičke karakteristike i kemijske komponente konoplje i lana

Prirodna vlakna	Celuloza (wt %)	Hemiceluloza (wt %)	Lignin (wt %)	Pektin (wt %)	Vosak (we %)
Konoplja	70,2-74,4	17,9-22,4	3,7-5,7	0,9	0,8
Lan	71-78	18,6-20,6	2,2	2,3	1,7

Celuloza je dominantna i ujedno najjača komponenta prirodnih vlakana. Daje čvrstoću, krutost i stabilnost vlaknu. Celuloza, kao prirodni polimer, napravljena je od jedinica glukoze koja tvori dugi lanac. Jedan je veoma značajan nedostatak celuloze to što ima hidrofilne karakteristike koje dovode do lošijih karakteristika vlakna koja se odnose na upijanje vode, a također osigurava loš kontakt s hidrofobnim materijalima [26]. Celuloza ima pozitivan utjecaj na vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti vlakna. Hemiceluloza sadrži veliki broj hidroksilnih i acetil grupa. Nažalost, topljiva je u vodi. Također, hemiceluloza osigurava pozitivan utjecaj na modul elastičnosti. Lignin, također polimer, ima kao glavnu ulogu da povezuje i drži vlakna zajedno. Veća količina lignina u vlaknu negativno utječe na modul elastičnosti i vlačnu čvrstoću. Iako prirodna vlakna imaju sjajan utjecaj na mehaničke karakteristike materijala na bazi cementa, oni s vremenom degradiraju kada se nađu u alkalnoj sredini [1]. Provođenjem ispitivanja različitih prirodnih vlakana nakon 56 ciklusa smrzavanja i

odmrzavanja (koja su bila prethodno potopljena u tripostotnu otopinu natrijklorida) uočen je znatan pad žilavosti materijala, slika 6. Međutim, iako je značajni gubitak nakon spomenutog ispitivanja trajnosti, i dalje su veće žilavosti postignute kod materijala s prirodnim vlaknima u usporedbi s materijalima koji ne sadrže vlakna, što nam svakako daje opravdanost za daljnje istraživanje.



Slika 6. Žilavost materijala s prirodnim vlaknima i bez njih nakon ispitivanja trajnosti [19]

6 Mehanizmi degradacije vlakana i njihova zaštita u alkalnoj sredini

Tri su glavna razloga za degradaciju vlakna [1]:

- rastvaranje hemiceluloze i lignina zbog alkalne vode u porama
- mineralizacija vlakna, kristalizacija kalcij hidroksida na stjenkama i lumenu vlakna
- alkalna hidroliza molekula celuloze koja ih uništava i upravo tako smanjuje vlačnu čvrstoću.

Postoji nekoliko već dokazanih mogućnosti da se osigura efikasna zaštita vlakana. Neka od njih su direktno smanjenje alkalnosti uporabom npr. letećega pepela, metakaolina, zgure... kao zamjene cementa, zatim kemijska impregnacija vlakana, fizički tretmani vlakana (npr. hornifikacija) i ostali. Kako bi se izabrao najpraktičniji, najučinkovitiji i ekonomski najisplativiji materijal, napravljen je kratak pregled literature i napravljena je klasifikacija [1]. Potvrđeno je da se npr. zamjenom Portland cementa s 30 % w/w metakaolinom i 20 % w/w kaolinskom glinom može već nakon 28 dana postići materijal koji je potpuno bez sadržaja $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [27]. Također, tretiranje vlakana s npr. NaOH prije njihove impregnacije u alkalnoj sredini znatno utječe na karakteristike vlakana i smanjenje njihove degradacije [28].

7 Zaključak

Nakon odabira najboljega načina za zaštitu vlakana u alkalnoj sredini, provođenjem ispitivanja planira se njihova upotreba u AAM. Poteškoća koja predstavlja potencijalnu opasnost odnosi se na djelovanje alkalija na vlakna. Još uvijek nije jasno određeno kako i u kojoj mjeri alkalije oštećuju vlakna. Trenutačno ne postoje podaci veza niza istraživačkih radova u području konoplje u neorganskim polimerima. Završetkom planiranih ispitivanja nastoji se ostvariti značajni doprinos u razumijevanju rada vlakana u AAM.

Kao već prepoznatu mogućnost primjene AAM-a u građevinskoj industriji, koja za cilj ima značajno smanjenje emisije ugljičnog dioksida, cilj istraživanja bit će poboljšanje mehaničkih karakteristika, zajedničkoga rada AAM-a i prirodnih vlakana, kao moguće, održivo i efikasno djelovanje u cilju dobivanja proizvoda s obećavajućim karakteristikama.

Literatura

- [1] Merta, I., Poletanovic, B., Kopecsko, K.: Durability of natural fibres within cement-based materials - Review, accepted for publication in: Concrete structures, fib journal (2017)
- [2] CEMBUREAU, Activity Report 2015, Brussels 2016
- [3] Greer, W.L., Hawkins, G.J., Carter, T.B.: Air Emissions and Control Measures (2004), Chap.6.1, Innovations in Portland Cement Manufacturing. Skokie
- [4] CornerStone, The official journal of the world coal industry, <http://cornerstonemag.net/the-rise-and-potential-peak-of-cement-demand-in-the-urbanized-world/>
- [5] Scrivener, K.L., John, V.M., Gartner, E.M.: Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry, United Nations Environment Programme, Paris 2016.
- [6] Provis, J.I.: Introducing AAMs and RILEM TC 247- DTA, International workshop on Alkali-Activated Materials, ZAG 2017, Slovenia
- [7] A blueprint for a climate friendly cement industry, http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/englishsummary__lr_pdf.pdf
- [8] Paecheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindapasirt, P.: Handbook of Alkali- activated Cements, Mortars and Concretes, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 54(2015), ISBN 978-1-78242-288-4
- [9] Komljenović, M., Bašćarević, Z., Bradić, V.: Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers, J Hazard Mater, 181 (2014) 1-3, pp. 35-42.

- [10] Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.: Characterisation of fly ashes: potential reactivity as alkaline cements, *Fuel*, 82 (2003), pp. 2259-2265.
- [11] van Riessen, A., Chen-Tan, N.: Beneficiation of Collie fly ash for synthesis of geopolymer. Part 2 – Geopolymers', *Fuel*, 111 (2013), pp. 829-835.
- [12] Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Sobrados, I., Sanz J.: The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes, *Micropor Mesopor Mater*, 91(2006), pp. 111-119.
- [13] Provis, J.L., Duxson, P., van Deventer, J.S.J.: The role of particle technology in developing sustainable construction materials, *Adv Powder Technol*, 21 (2010) 1, pp. 2-7.
- [14] Kumar, R., Kumar, S., Mehrotra, S.P.: Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation, *Resourc Conserv Recyc*, 52 (2007), pp. 157-159,
- [15] Davidovits, J.: The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information, In: Gibb, J.M., Nicolay D. (eds.) *Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information*, EUR 7716, pp. 316-320, Commission of the European Communities, Luxembourg, 1982.
- [16] Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S.J.: Geopolymer technology: the current state of the art, *J Mat Sci*, 42 (2007) 9, pp. 2917-2933.
- [17] Winnefeld, F., Leemann, A., Lucuk, M., Svoboda, P., Neuroth, M.: Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials, *Constr Build Mater*, 24 (2010), pp. 1086-1093.
- [18] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., Cao, T.: High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash, *J Mater Civ Eng*, 23(2011) 3, pp. 264-270.
- [19] Merta, I., Šajna, A., Poletanović, B., Milovanović, A.: Influence of natural fibers on mechanical properties and durability of cementitious mortars, *CoMS- 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future*, pp. 1-8, 2017.
- [20] Merta, I., Tschegg, E.K. Fracture energy of natural fibre reinforced concrete, *Original Research Article Construction and Building Materials*, 40 (2013), pp. 991-997
- [21] Merta, I., Tschegg, E., Tschegg, S., Kolbitsch, A.: Fracture Mechanics of Concrete Reinforced With Hemp, Straw and Elephant Grass Fibres, *Composite Materials: Key to the Future*, 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island, Korea, 2011.
- [22] Savastano, J.H., Warden, P.G., Coutts, R.S.P.: Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cem. Concr. Compos*, 22 (2000), pp. 379–384.
- [23] Tolêdo Filho, R.D., Ghavami, K., England, G.L., Scrivener, K.: Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability, *Cement & Concrete Composites*, 25 (2003), pp. 185–196.

- [24] Dicker, M.P.M., Duckworth, P.F., Baker, A.B., Francois, G., Hazzard, M.K., Weaver, P.M.: Green composites: A review of material attributes and complementary applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 56 (2014), pp. 280-289.
- [25] Gurunathan, T., Mohanty, S., Nayak, S.K.: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77 (2015), pp. 1-25.
- [26] Yan, L., Kasal, B., Huang, L.: A review of recent research on the use of cellulosic fibers, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering, *Composites Part B, Engineering*, 92 (2016), pp. 94-132
- [27] Silva, F.A., Tolêdo Filho, R.D., Melo Filho, J.A., Rego Fairbairn, E.M.: Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. *Constr Build Mater*; 24 (2010) 5, pp. 777–785.
- [28] Weyenberg, I.V., Ivens, J. , Coster, A., Kino, B., Beatens, E., Verpoest, I.: Influence of processing and chemical treatment of flax fibers on their composites. *Composites Science and Technology*, 63 (2003), pp. 1241-1246.

Numerički modeli izdvojene ploče i grede inženjerskih konstrukcija

Karlo Kopljar¹, prof.dr.sc. Mladen Meštrović²

¹ Institut IGH d.d., Zavod za materijale i konstrukcije, karlo.kopljar@igh.hr

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

Sažetak

Razmotreni su osnovni numerički modeli inženjerskih konstrukcija na realnoj konstrukciji. Promatran je primjer armiranobetonske ploče koja je slobodno oslonjena po rubovima, a u sredini oslonjena na armiranobetonsku gredu. Realna konstrukcija je aproksimirana na deset različitih načina te su uspoređeni rezultati proračuna. Uspoređene su vrijednosti momenata savijanja, potrebne armature i vrijednosti elastičnih progiba. Upozorilo se i na moguće pogreške koje bi se mogle izbjegnuti znanjem i iskustvom te je objašnjen pojam kinematičkoga ograničenja na realnomu primjeru. Za provedbu proračuna upotrijebljen je programski paket CSI SAP2000, utemeljen na metodi konačnih elemenata. Uočene su znatne razlike u rezultatima proračuna ovisno o primijenjenoj aproksimaciji.

Cljučne riječi: numerički model, metoda konačnih elemenata, SAP 2000, ploča, greda, aproksimacija

Design models of extracted slab and beam for engineering structures

Abstract

Basic design models of engineering structures are studied on a real-life structure. An example of a reinforced concrete slab, pinned at the edges and supported in the middle by a reinforced concrete beam, is considered. The real structure is approximated in ten different ways, and calculation results are compared. Bending moment values, required reinforcement, and elastic deflection values, are compared. Possible mistakes that could be avoided by knowledge and experience are indicated, and the concept of constraints is explained on a real example. A software package based on the finite element method, CSI SAP2000, is used for structural calculations. Significant differences in design results, depending on the type of approximation used, have been registered.

Key words: design model, finite element method, SAP 2000, slab, beam, approximation

1 Uvod

Riječ SAP potječe iz engleskoga govornog područja i u žargonu označava lakovjernu osobu. Naziv SAP (skraćeni naziv poznatoga računalnog programa za proračun konstrukcija SAP2000) odabran je da bi se korisnik sjetio da program, kao i svi računalni programi, nema inteligenciju. Odgovornost je na inženjeru da ispravno aproksimira konstrukciju i prihvati odgovornost za rezultate proračuna [1].

Točnost računala je nedvojbeno. Računala mogu izračunati po volji točan rezultat, mnogo točnije i brže od čovjeka. No, je li velika točnost potrebna u građevinarstvu i koliko joj se smije vjerovati? Postoji nekoliko izvora pogrešaka. Pogreške se mogu podijeliti na one koje se mogu i na one koje se ne mogu izbjeći. Pogreške koje se mogu izbjeći ponajprije su proizvod neznanja poput loše koncepcije objekta, lošega modeliranja, neispravnoga programskog koda, postupka proračuna ili pogreške poput krivog množenja. Neizbježne pogreške nastaju pri aproksimaciji projektirane konstrukcije matematičkim modelom, pri aproksimaciji matematičkoga modela numeričkim, pri rješavanju numeričkoga modela, zbog netočnosti izvedene konstrukcije u odnosu na projektiranu. Pogreške pri aproksimaciji projektirane konstrukcije matematičkim modelom i pogreške zbog netočnosti izvedene konstrukcije u odnosu na projektiranu možemo svesti na jednu: pogreške koje nastaju zbog razlike između matematičkoga modela i izvedene konstrukcije. Te su pogreške bile mnogo veće prije uporabe računala, ali i danas dominiraju i mnogo su češće od ostalih [2]. Mišljenje je autora da, iako računalni programi za proračun konstrukcija postoje već jako dugo vremena, većina korisnika nije dovoljno upoznata s teorijama i pretpostavkama koje stoje iza njih. Iako postoji mnogo radova koji skreću pozornost na tu problematiku, mišljenje je autora da ih ne postoji dovoljno koji su prikazali navedenu problematiku na realnomu primjeru.

Cilj je rada zainteresirati čitatelje koje ne zanimaju komplicirane matematičke jednadžbe nego primjeri koje mogu primijeniti u svomu svakodnevnom radu. Promatrat će se utjecaj odabranoga modela na momente savijanja koji se javljaju u armiranobetonskoj gredi i armatura koja je potrebna za izračunani moment savijanja. Također će se promatrati i elastični progib. Autori su upoznati s činjenicom da se pri pojavi pukotina u armiranobetonskim elementima javlja nelinearan problem i da bi ispravan pristup problematici progiba bio preko nelinearnoga proračuna. No cilj rada nije izračunati točan progib nego usporediti aproksimacije modela.

U inženjerskim krugovima uvriježeno je mišljenje kako je proračun dugotrajnoga progiba kompliciran i dugotrajan proces i zbog toga se često izbjegava. Većinom se problem određivanja dugotrajnoga progiba rješava tako da se kratkotrajni elastičan progib uveća tri do četiri puta. U duhu toga, promotrit će se kako na elastični progib grede utječe uzimanje u obzir momenta tromosti za raspucani presjek u vlaklu do neutralne osi za kratkotrajno djelovanje.

2 Matematički podmodeli

Dijelovi realnih konstrukcija aproksimiraju se odabirom odgovarajućega podmodela. U radu su uzeti u razmatranje podmodeli štapa i podmodeli ploče.

2.1 Podmodel štapa

Ako tijelo ima jednu dimenziju mnogo veću od preostale dvije, uvodi se podmodel štapa. Štap nije potrebno analizirati kao trodimenzionalni kontinuum. Dovoljno ga je smatrati linijom koja se naziva os štapa. Preostale dvije dimenzije uzimaju se u obzir odabirom poprečnoga presjeka štapa [2].

2.2 Podmodel ploče

Podmodel ploče dobiva se ako se pretpostavke podmodela štapa primijene u dvije dimenzije. Ploča je tijelo kojem je debljina puno manja od preostale dvije dimenzije. Po tlocrtnome obliku najčešće je pravokutna ili kvadratna, ali može biti i trokutna, kružna ili prstenasta [2].

2.3 Ostali podmodeli

Osim podmodela štapa i ploče postoje još dva podmodela: ljuska i ravninsko stanje koje se ovisno o pretpostavkama dijeli na ravninsko stanje naprezanja, ravninsko stanje deformacija i osnosimetrično stanje. Svaki od tih podmodela ima svoje podinačice [2].

3 Primjena kinematičkih ograničenja

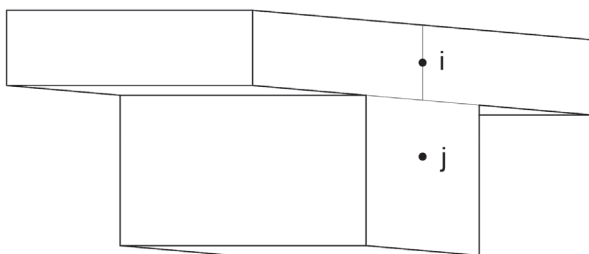
Numerički se modeli uvijek svode na sustav linearnih jednadžbi ravnoteže oblika

$$\mathbf{Ku} = \mathbf{f} \quad (1)$$

gdje je \mathbf{K} matrica krutosti, \mathbf{u} vektor nepoznatih pomaka, a \mathbf{f} vektor opterećenja.

Iako je vektor pomaka nepoznanica, ponekad se mogu unaprijed odrediti neki pomaci i/ili definirati njihovi odnosi. Tada se govori o ograničenjima vektora pomaka. Takva se ograničenja najčešće uvode odabirom odgovarajućega podmodela [2]. Pretežito se primjenjuje podskup kinematičkih ograničenja koja se temelje na pretpostavci o apsolutno krutim vezama među stupnjevima slobode.

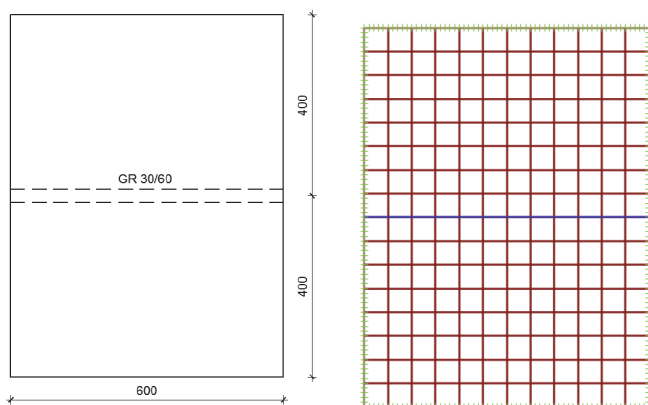
U praksi se često nailazi na model ploče s gredama (slika 1.). Prirodno je upotrijebiti plošni konačni element sa četiri čvora za modeliranje ploče i štapni konačni element s dva čvora za modeliranje grede. Oba elementa imaju 6 stupnjeva slobode po čvoru. Problem je što nemaju zajedničkih čvorova u prostoru kojima bi se povezala ta dva tipa elemenata. Problem se rješava tako da se čvor i , u osi ploče, spoji sa čvorom j u neutralnoj osi grede apsolutno krutim elementom. Na taj se način osigurava prirodna interakcija plošnoga i štapnog konačnog elementa. Uz smanjenje broja nepoznanica, rješava se i problem odabira sudjelujuće širine ploče [1].



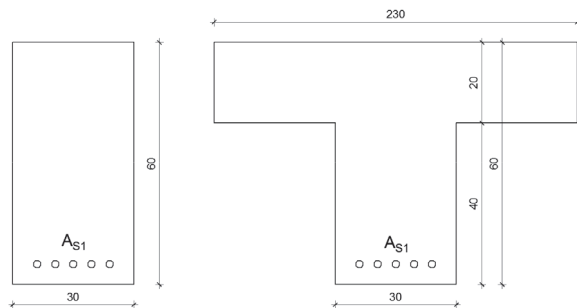
Slika 1. Model spoja ploče i grede

4 Numerički model izdvojene ploče i grede

Izrađen je numerički model ploče debljine 20 cm dimenzija 6,00 x 8,00 m slobodno oslonjene po rubovima, a u sredini oslonjene na gredu širine 30 cm i visine 60 cm (slike 2. i 3.). Ploča i greda izrađene su od armiranoga betona razreda C25/30, pri čemu je upotrijebljena armatura B500B. Ploča je opterećena vlastitom težinom, dodatnim stalnim opterećenjem od 2 kN/m² i korisnim opterećenjem od 2 kN/m².



Slika 2. Tlocrt ploče s dimenzijama (lijevo) i numerički model (desno)



Slika 3. Pravokutni poprečni presjek grede (lijevo) i T-presjek grede sa sudjelujućom širinom (desno)

Analizirano je 10 različitih varijanata numeričkoga modela. U svim je modelima ploča modelirana plošnim konačnim modelima. Promatrane su razlike u rezultatima proračuna zbog aproksimacije matematičkog modela numeričkim temeljem čega se upozorava na moguće pogreške u analiziranju rezultata. Promotren je i utjecaj redukcije krutosti grede i utjecaj nadvišenja grede na rezultate proračuna. Prilikom odabira mogućih numeričkih modela uzeto je u obzir ono što bi primijenili manje upućeni korisnici programskih paketa.

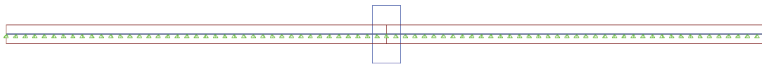
Prvi numerički model jedan je od najčešćih modela. Greda je modelirana štapnim konačnim elementom kao pravokutni poprečni presjek u kojem je težište grede postavljeno u os ploče. Takav model korisnik postiže ako uloži minimalan trud u modeliranje. Modeliranje takvim postupkom nije u potpunosti ispravno budući da računalni program ne uzima u obzir sudjelujuću širinu ploče.

U drugomu numeričkom modelu greda je modelirana štapnim konačnim elementom kao pravokutni poprečni presjek, no težište je grede pomaknuto od osi ploče kako bi odgovaralo realnoj konstrukciji. Težište grede i os ploče povezuje se ranije opisanim kinematičkim ograničenjima koje računalni program samostalno postavlja. Modeliranjem takvim postupkom uzima se u obzir sudjelujuća širinu ploče, no u gredi se javlja vlačna sila koja se ne smije zaboraviti pri interpretaciji rezultata proračuna.

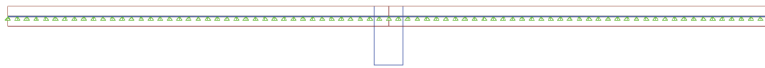
U trećemu numeričkom modelu greda je modelirana plošnim konačnim elementima okomito na os ploče. Greda je zadana kao plošni element debljine 30 cm, a po visini je podijeljena na 5 konačnih elemenata, što je minimalno za pravilnu interpretaciju rezultata proračuna. Problematika je ovakvoga modeliranja interpretacija rezultata budući da za prikaz momenata savijanja i sila treba integrirati naprezanja i/ili sile što korisnik mora samostalno napraviti.

U četvrtomu numeričkom modelu greda je modelirana odvojeno od ploče. Takav je numerički model najbliži "ručnomu" proračunu greda (hijerarhijski model konstrukcije), pri čemu je greda za ploču apsolutna kruta i nepomična te ima funkciju linijskoga nepomičnog ležaja. U tom slučaju reakcije u linijskom ležaju ploče opterećenja su na gredu. Greda je modelirana kao T-presjek štapnim konačnim elementom u zasebnom modelu.

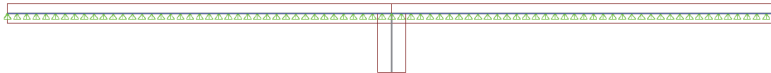
Sljedeća su tri modela podvarijante modela 1, 2 i 4. Na ta je tri modela primijenjen reducirani moment tromosti za raspucani presjek u vlaklu do neutralne osi za kratkotrajno djelovanje. Pretpostavljena je armatura u donjoj zoni $5\varnothing 20$. Armatura u gornjoj zoni se zanemaruje. Na modelu 1 primijenjen je reducirani moment tromosti za pravokutni poprečni presjek budući da programski paket ne uzima u obzir sudjelujuću širinu presjeka. Na modelu 2 i 4 primijenjen je reducirani moment tromosti za T-presjek grede. Za pravokutni poprečni presjek redukcija momenta tromosti iznosi 64,32 %, dok za T-presjek grede redukcija momenta tromosti iznosi 78,12 % [3, 4]. Posljednja su tri modela također podvarijante modela 1, 2 i 4. Na ta tri modela analiziran je utjecaj početnoga nadvišenja grede. Na trećinama je greda nadvišena za 1 cm, dok je na polovici presjeka greda nadvišena za 1,5 cm. Nadvišenje se postiže crtanjem modela. Prikaz Modela 1 do Modela 10 dan je na slikama 4. do 13.



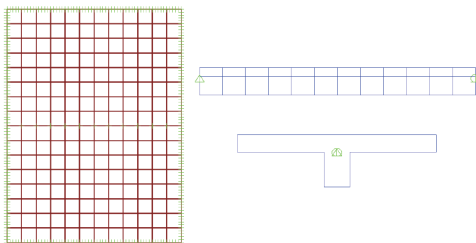
Slika 4. Model 1 - greda modelirana "štapno"



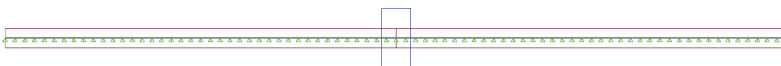
Slika 5. Model 2 - greda modelirana "štapno" s pomaknutim težištem



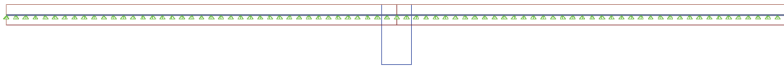
Slika 6. Model 3 - greda modelirana "plošno"



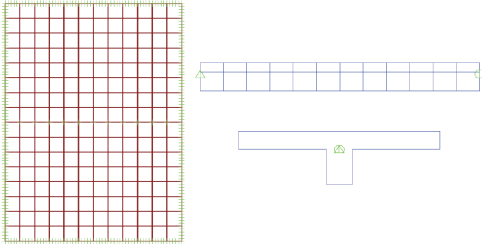
Slika 7. Model 4 - greda modelirana "štapno" odvojeno od ploče



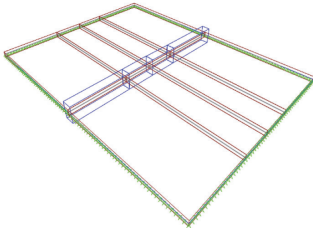
Slika 8. Model 5 - greda modelirana "štapno" s reduciranim momentom tromosti grede za raspucani presjek



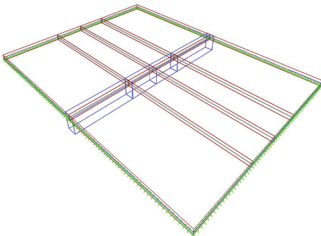
Slika 9. Model 6 - greda modelirana "štapno" s pomaknutim težištem i reduciranim momentom tromosti grede za raspucani presjek



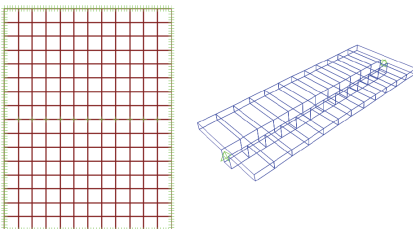
Slika 10. Model 7 - greda modelirana "štapno" odvojeno od ploče s reduciranim momentom tromosti grede za raspucani presjek



Slika 11. Model 8 - greda modelirana "štapno" s početnim nadvišenjem



Slika 12. Model 9 - greda modelirana "štapno" s pomaknutim težištem i početnim nadvišenjem



Slika 13. Model 10 - greda modelirana "štapno" odvojeno od ploče i s početnim nadvišenjem

5 Usporedba rezultata numeričkih modela

Odvojeno su promatrani rezultati ploče i grede. Za ploču su promatrani momenti savijanja u polju i nad ležajem. Za gredu su promatrani moment savijanja, uzdužna sila i progib. Potrebna je armatura za sve numeričke modele izračunana "ručnim" postupkom prema normi HRN EN 1992 [5] budući da u računalnom programu SAP2000 nije moguće izračunati potrebnu armaturu u elementima modeliranim plošnim konačnim elementima. Za numeričke modele u kojima se ne uzima u obzir sudjelujuća širina ploče dimenzioniranje je provedeno za gredu pravokutnoga presjeka bez sudjelujuće širine. Prikaz rezultata dan je u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba rezultata numeričkih modela

Oznaka modela	Ploča			Greda				w [mm]
	M _{xm} [kNm/m']	M _{ym} [kNm/m']	M _{ey} [kNm/m']	Moment savijanja		Uzdužna sila		
				M [kNm]	A _{s,req} [cm ²]	N [kN]	A _{s,req} [cm ²]	
Model 1	18,07	14,84	3,67	130,84	5,75	0,00	0,00	2,16
Model 2	12,74	13,48	-4,52	87,78	3,71	474,27	10,91	1,44
Model 3	10,09	12,82	-9,58	61,44	2,59	841,82	19,36	1,02
Model 4	5,20	11,70	-21,87	279,11	11,91	0,00	0,00	2,14
Model 5	26,15	16,98	13,94	66,17	2,85	0,00	0,00	3,05
Model 6	16,12	14,30	0,81	27,94	1,17	620,82	14,28	1,88
Model 7	5,20	11,70	-21,87	279,11	11,91	0,00	0,00	9,47
Model 8	17,13	15,03	8,98	129,98	5,50	-28,13	0,00	2,15
Model 9	14,41	12,74	2,08	90,42	3,82	469,12	10,79	1,48
Model 10	9,73	9,06	-15,03	279,07	11,91	0,00	0,00	2,14

Hijerarhijski je pristup analizi konstrukcija u predračunalno vrijeme bio gotovo jedini način proračuna konstrukcija. Taj je pristup približan, jer ne postoji samo jednosmjerni utjecaj hijerarhijski nižega na viši element i obrnuto. Uglavnom se smatra da je kod sustava s jasnom hijerarhijom taj pristup na strani sigurnosti [2]. Te su pretpostavke potvrđene u ovom radu. Modeli 4, 7 i 10 kombinacija su računalno-hijerarhijskoga pristupa. Rezultati proračuna daju najveću količinu armature u donjoj zoni presjeka. U modelima 1, 5 i 8, u kojima se ne uzima u obzir sudjelujuća širina presjeka, potrebna je veća količina armature u donjoj zoni nego u modelima u kojima je sudjelujuća širina uzeta u obzir. Ako se pogledaju vrijednosti momenata u ploči nad gredom, može se zaključiti da u modelima bez sudjelujuće širine nije u potpunosti formiran ležaj u ploči. U modelu 2, u kojem je greda modelirana štapnim konačnim elementima s pomaknutim težištem, formirao se ležaj u ploči nad gre-

dom. Proračunom je dobivena manja armatura grede za moment savijanja u donjoj zoni nego u elementima bez sudjelujuće širine. No, nikako se ne smije zaboraviti na uzdužnu vlačnu silu i njezinu potrebnu armaturu koju treba raspodijeliti po cijelom presjeku grede. U modelu 3, u kojem je greda modelirana plošnim konačnim elementom, formirao se ležaj u ploči nad gredom. Kao što je prije navedeno, interpretacija rezultata kod ovoga numeričkog modela nije jednostavna budući da treba "ručno" integrirati naprezanja i/ili sile po visini presjeka. Usporedbom s modelom 2, koji je najbližiji modelu 3, rezultati pokazuju da je u modelu 3 potrebna manja količina armature za moment savijanja, a veća količina armature od uzdužne vlačne sile. Uzimanje u obzir reduciranoga momenta tromosti presjeka rezultiralo je na modelima 5 i 6 smanjenjem unutarnjih sila i količine armature u gredi u odnosu na modele 1 i 2. Smanjenjem momenta tromosti grede ploča je preuzela veći dio opterećenja. U modelu 5 u potpunosti je nestao ležaj nad gredom. U sva tri modela u kojima je uzet u obzir reducirani moment tromosti presjeka uočeno je povećanje progiba. U modelu 7, u kojem je greda modelirana odvojeno od ploče, uočeno je povećanje progiba od 343%. To povećanje progiba odgovara inženjerskim iskustvima iz prakse. Izvedba grede s nadvišenjem nije rezultirala razlikom u rezultatima. To potvrđuje da grešku geometrije ne treba uzimati u obzir ako je u razumnim iznosima.

6 Zaključak

Rezultati istraživanja pokazuju da u naizgled trivijalnomu primjeru ploče s gredom različiti numerički modeli daju velike razlike u rezultatima. Najjednostavniji se model pokazao kao netočan, jer ne uzima u obzir sudjelujuću širinu presjeka. Realniji su modeli pokazali da treba više truda uložiti za interpretaciju rezultata. Hijerarhijski je model konstrukcije pokazao da je najviše na strani sigurnosti. Redukcijom momenta tromosti na izdvojenoj gredi dobiven je omjer među progibima koji odgovara inženjerskim iskustvima iz prakse. Može se zaključiti da treba vrlo oprezno pristupiti proračunu konstrukcija i shvatiti da je odgovornost inženjera, a ne računalnoga programa da pravilno aproksimira konstrukciju i prihvati odgovornost za rezultate proračuna.

U budućim istraživanjima bilo bi poželjno na numeričkim modelima iz ovog rada provjeriti dugotrajan progib nelinearnim proračunom i usporediti ga s dobivenim rezultatima elastičnog progiba uz redukciju momenta tromosti.

Literatura

- [1] Wilson, E.L.: SAP, A General Structural Analysis Program, Report to Walla Walla District, U.S. Engineers Office, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, 1970.

- [2] Lazarević, D., Dvornik, J.: Plošni nosači. Bilješke s predavanja, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, 2014. (link za preuzimanje: http://www.grad.unizg.hr/_download/repository/plosni.pdf)
- [3] Sorić, Z., Kišiček, T.: Betonske konstrukcije 1, Projektiranje betonskih konstrukcija prema europskim normama EN. Skripta Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, 2011.
- [4] Sorić, Z., Kišiček, T.: Betonske konstrukcije 2, Projektiranje betonskih konstrukcija prema europskim normama EN. Skripta Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, 2012.

Pojačanja nearmiranog ziđa na posmik tkaninom armiranim mortovima (TRM)

Martina Carić¹, izv.prof.dr.sc. Tomislav Kišiček²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, mcari@grad.hr

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

Sažetak

Za pojačavanje postojećih konstrukcija posljednjih se godina uz vlaknima armirane polimere (FRP) istražuju tkaninom armirani mortovi (TRM). Kao i FRP, TRM kompoziti mogu značajno povećati nosivost i duktilnost postojećih konstrukcija, ali zbog različitih matrica kompozita njihovo ponašanje nije jednako. Pri proračunu nosivosti i uporabivosti od velike je važnosti osigurati puno kompozitno djelovanje TRM-a s elementom koji se pojačava kako bi materijal bio čim bolje iskorišten. Pri pojačanju zidova na posmik TRM-om važno je utvrditi utjecaj broja i konfiguracije slojeva tkanine, vrste i debljine morta, vrste vlakana te način sidrenja TRM-a, kako bi se materijal učinkovito iskoristio i kako bi ga inženjeri u praksi aktivno upotrebljavali u području sanacija.

Cljučne riječi: TRM, kompoziti, nearmirano ziđe, pojačanja, tkanina

Shear strengthening of unreinforced masonry walls with textile reinforced mortars (TRM)

Abstract

In recent years, textile reinforced mortars (TRM) have been investigated, together with fibre reinforced polymers (FRP), as a means for strengthening existing structures. Both TRM and FRP composites can significantly increase the load bearing capacity and ductility of the existing structures but, because of different matrices, their behaviour is not the same. When calculating the load bearing capacity and serviceability, it is highly significant to provide for a full composite action of TRM and the element being strengthened to ensure an optimum utilization of the material. For shear strengthening with TRM, it is important to determine the influence of the number of TRM layers and their configuration, type and thickness of mortar, type of fibres, and TRM anchoring possibilities, in order to enable an efficient use of this material so as to ensure its more widespread use by practical engineers in the repair and rehabilitation of structures.

Key words: TRM, composites, unreinforced masonry walls, strengthening, textile

1 Uvod

Zidanje je jedan od glavnih načina gradnje do pojave modernijih materijala, poput betona i čelika, koji seže još od razdoblja starih civilizacija. Starije građevine izvedene su uglavnom od kamenih ili opečnih zidanih elemenata povezanih vapnenim ili produžnim mortom bez armiranja. Danas u svijetu i u Hrvatskoj postoji veliki broj nearmiranih ili djelomično armiranih zidanih građevina [1].

U prošlosti su se zidane građevine često gradile na temelju iskustva ili su bile proračunane samo za vertikalno opterećenje. Izloženi horizontalnim djelovanjima vjetrova i potresa, uz ostale uzroke degradacije materijala i grešaka tijekom izvođenja, zidovi trpe deformacije u svojoj ravnini i izvan ravnine koje u konačnici uzrokuju slom zidanih konstrukcija. Budući da je Hrvatska smještena u području jake seizmičke aktivnosti, nearmirane zidane građevine ugrožene su pojavom jačega potresa. Pri potresnom djelovanju ziđe nema sposobnost disipacije – trošenja energije kroz neelastične deformacije. Ziđe može otkazati na dva glavna načina – slom ziđa u ravnini koji može biti posmični ili slom savijanjem te slom ziđa izvan ravnine u kojem dominira savijanje [2].

Zbog već nastalih oštećenja, a i mogućnosti nastanka novih, sve je veća orijentacija inženjera na projekte obnove i sanacije, odnosno pojačanja i popravaka konstrukcija. Kod zidanih konstrukcija istraživane su i primjenjivane razne tehnike pojačanja s naglaskom na povećanje vlačne i posmične čvrstoće te duktilnosti, kao slabih svojstava ziđa, posebno važnih u seizmički aktivnim područjima.

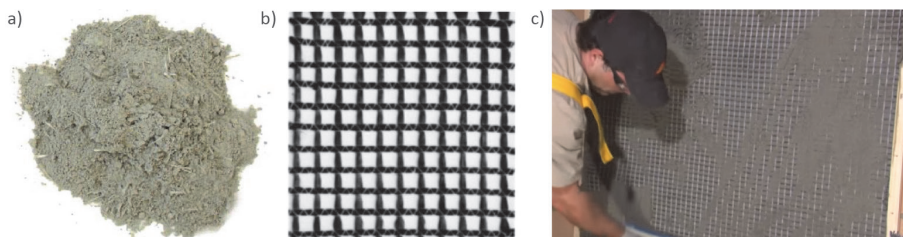
Tradicionalne su tehnike pojačavanja ziđa injektiranje pukotina, oblaganje zidova (torketiranjem, ojačanom žbukom, fero cementom), vanjska pojačanja (prednapinjanje). Iako su tradicionalne metode često prikladna rješenja za pojačanja zidanih konstrukcija, postoje ograničenja njihove uporabe, osobito kod građevina kulturne baštine zbog zahtjeva konzervatora [3]. Zbog toga se razvojem novih materijala razvijaju i nove tehnike pojačavanja konstrukcija, kao što su pojačavanje zidova vlaknima armiranim (modificiranim) mortovima (engl. *fiber reinforced mortars* - FRM), vlaknima armiranim polimerima (engl. *fiber reinforced polymers* - FRP) i tkaninama armiranim mortovima (engl. *textile reinforced mortars* - TRM). Mnogi istraživači proučavaju pojačanja modernim tehnikama, posebice FRP i TRM kompozitima, ali zbog širokog raspona vlakana i mortova i činjenice da je ziđe regionalnoga karaktera, potrebno je provesti još ispitivanja kako bi se utvrdila vjerodostojnost metoda i kako bi se u konačnici dale preporuke za pojačanja koje će biti uvedene u buduće norme i smjernice.

2 TRM kompoziti

2.1 Razvoj TRM kompozita

FRP su kompoziti koji se sastoje od armaturnih vlakana, najčešće staklenih (engl. glass, G), ugljičnih (engl. Carbon, C), aramidnih (engl. aramid, A), povezanih polimernom matricom, najčešće epoksidnom smolom. Kod pojačanja konstrukcija FRP kompoziti zauzimaju važno mjesto zbog svojih povoljnih svojstava: otpornost na koroziju, visoka vlačna čvrstoća i krutost u smjeru vlakana, iznimno velik omjer čvrstoće i težine, mogućnost primjene u raznim oblicima neograničenih duljina, neosjetljivost na magnetizam i neprovođenje električne struje, dobro ponašanje pod dinamičkim djelovanjem te jednostavnost i brzina primjene. Ipak, FRP kompoziti imaju i nedostatke koji se najviše pripisuju smolama matrice: linearno - elastično ponašanje do sloma, loše ponašanje epoksida na temperaturama višima od temperature staklastog prijelaza i ispuštanje toksičnih plinova prilikom izgaranja zbog čega moraju imati prikladnu zaštitu, nemogućnost nanošenja pri niskim temperaturama i na mokrim podlogama te nekompatibilnost materijala podloga i epoksidnih smola zbog čega je važna priprema površine kako ne bi došlo do preuranjenoga odvajanja FRP - a, manjak paropropusnosti koji može dovesti do oštećenja betonskih konstrukcija i teže procjene štete na njima nakon potresa iza neoštećenoga FRP pojačanja te relativno visoka cijena epoksidnih smola [4, 5].

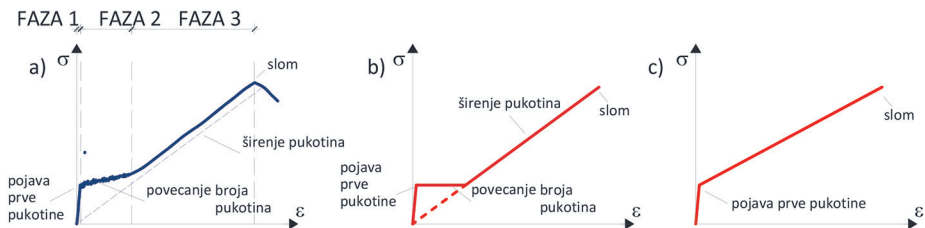
Promjena svojstava matrice, odnosno zamjena organskoga veziva anorganskim, postavlja se kao logično rješenje za navedena loša svojstva što dovodi do nastanka novih, TRM kompozita, u stranoj literaturi poznatih i kao fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) systems, mineral based composites (MBC) ili textile reinforced concrete (TRC) systems. Dok snopovi vlakana kod FRP - a mogu biti formirani u trake ili tkanine, TRM kompoziti su tkanine (mreže) od snopova vlakana u najmanje 2 (najčešće ortogonalna) smjera i anorganske matrice, jer se veza matrice i vlakana ostvaruje mehaničkim uklinjanjem, odnosno impregnacijom morta kroz razmake u mreži vlakana [5] (slika 1.). Gustoća mreže u svakom se smjeru može kontrolirati neovisno, što utječe na mehanička svojstva tkanine i na vezu s matricom. Vlakna koja mogu biti staklena, ugljična, bazaltna ili PBO (Zylon ili poly (p - phenylene - 2,6 - benzobisoxazole)) preuzimaju vlačna naprezanja, a matrica štiti vlakna i osigurava prijenos naprezanja s materijala koji se pojačava (betona ili ziđa) do vlakana, pa ovisno o vrsti vlakana postoji GTRM, CTRM, BTRM ili PBOTRM.



Slika 1. a) Cementna matrica; b) Mreža od ugljičnih vlakana; c) Nanošenje TRM - a na ziđe

2.2 Svojstva TRM kompozita

Kako bi se osigurao prijenos sila s podloge na TRM i osiguralo kompozitno djelovanje, važna je veza između podloge i matrice, veza matrice i vlakana te veza među vlaknima. Zbog složenog mehanizma prijenosa sila, postoji nekoliko modova otkazivanja TRM - a [6, 7]. Najčešći je mod otkazivanja odvajanje na površini tkanina – matrica, što rezultira ponašanjem koje nije linearno elastično, i uz njega se javlja proklizavanje i deformacija snopova vlakana. Kod uzoraka s jednim slojem pojačanja TRM - a često se javlja proklizavanje tkanine unutar matrice zbog slabe impregnacije vlakana. Treći je mod otkazivanja slom tkanine u matrici, a četvrti je odvajanje kompozita od podloge koja se pojačava, zbog čega je važna priprema podloge brušenjem i pjeskarenjem te injektiranjem postojećih pukotina. Na prionjivost kompozita utječe mnogo faktora [6, 7, 8]. Mort, odnosno matrica mora imati dobru obradivost, otpornost na skupljanje i viskoznost. Za bolju impregnaciju vlakana povoljan je sitniji agregat matrice, a snopovi vlakana mogu se obložiti smolom. Povećanjem broja slojeva i povećanjem duljine sidrenja do efektivne duljine prionjivost se neproporcionalno povećava. Sidrenje se može poboljšati ovijanjem duljine sidrenja ili mehaničkim sidrenjem.

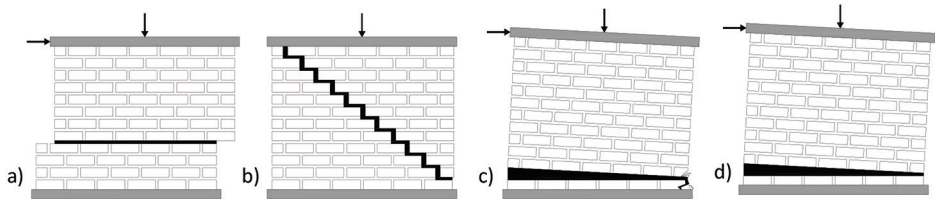


Slika 2. Radni dijagram TRM - a

Osim prionjivosti, za učinkovitost pojačanja važan je radni dijagram vlačno opterećenog uzorka TRM - a koji se sastoji od 3 faze (slika 2.a) [9]. Prva je faza linearno elastična i traje do pojave prve pukotine. U toj fazi primarnu ulogu u preuzimanju naprezanja ima matrica. Nakon pojave pukotine, krutost se smanjuje, a broj pukotina povećava (faza 2). U trećoj se fazi prethodne pukotine proširuju, nema nastanka novih, slika pukotina je stabilizirana s reduciranom krutosti u odnosu na neraspucalo stanje. Modul elastičnosti i čvrstoća u trećoj fazi ovise najviše o svojstvima tkanine, a ona traje do otkazivanja odvajanjem ili slomom vlakana. Triantafillou u [9] prikazuje pojednostavljeni radni dijagram (slika 2.b), a ACI 549 [10] predlaže pojednostavljenije radnoga dijagrama kao bilinearnog (slika 2.c).

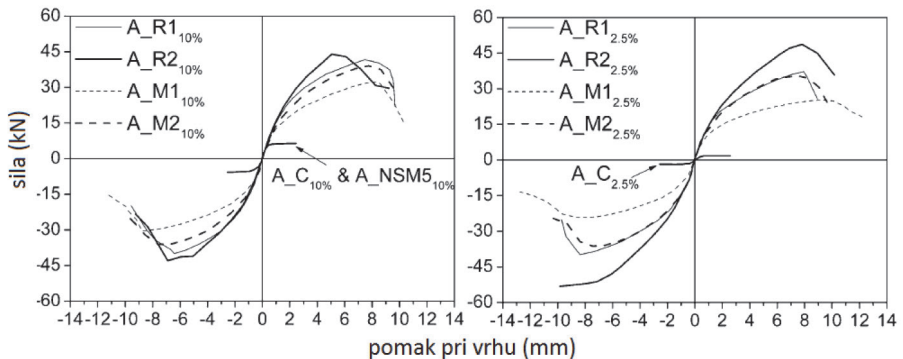
3 Pojačanja зида на posmik pomoću TRM - a

Nearmirani zidovi opterećeni u svojoj ravnini mogu otkazati klizanjem po sljubnicama morta kao najpoželjnijim oblikom sloma, dijagonalnim posmičnim slomom kao najčešćim načinom sloma koji nastaje razvojem vlačne pukotine u smjeru tlačne dijagonale, drobljenjem zida u tlačnom kutu i prevrtanjem zida zbog savijanja (slika 3.) [3, 11].



Slika 3. Oblici sloma зида u ravnini: a) klizanje po sljubnicama, b) dijagonalni, c) drobljenje u tlačnom kutu, d) prevrtanje

Jedno od prvih ispitivanja [12] (slika 4.) bilo je зиde pojačano s jednim ili dva sloja TRM - a od ugljičnih vlakana visoke čvrstoće i morta s polimernim vlaknima na cijeloj površini, s obje strane, izloženo vertikalnom tlačnom (2,5 % i 10 % tlačne čvrstoće) i cikličkom horizontalnom opterećenju. U uzorcima s jednim slojem pojačanja vlakna su se postupno lomila pri dnu зида uz pucanje matrice. Uzorci s dva sloja, koji su krutiji, lomili su se drobljenjem u tlačnom kutu i izvijanjem pojačanja. S obzirom na veću krutost većega broja slojeva, čvrstoća se povećava, ali se deformabilnost smanjuje. S povećanjem vertikalne sile nosivost se povećava dok se sposobnost deformiranja malo smanjuje. U usporedbi s pojačanjima s FRP - om, povećanje je čvrstoće je bilo manje (12 – 35 %), ali je povećanje deformabilnosti bilo veće (15 – 30 %), ovisno o broju slojeva i razini uzdužne sile.



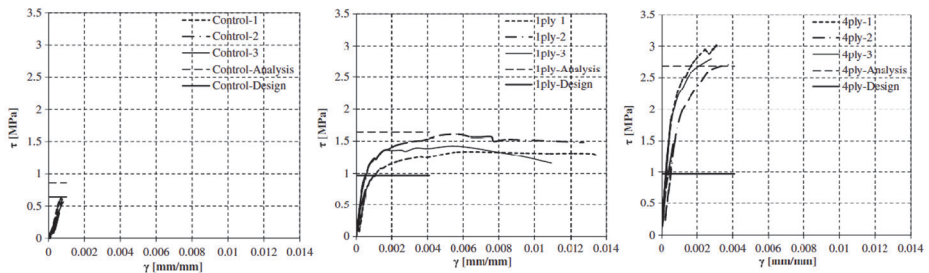
Slika 4. Histerezne anvelope ispitivanja [12] posmičnih zidova pojačanih jednim i dva sloja FRP - a i TRM - a ovisno o razini uzdužne sile (2,5 % i 10 % tlačne čvrstoće)

Corradi [13] je proveo terenska ispitivanja uzoraka zidova kod zgrada od kamena i opeke te laboratorijska ispitivanja zidova pojačanih s jednim slojem mreže od staklenih vlakana i matricom od morta te sidrima od FRP šipaka kako bi se izbjeglo odvajanje sloja pojačanja. Činjenica da su terenska ispitivanja provedena na uzorcima iz zgrada starih preko sto godina daje realniji uvid u učinkovitost pojačanja. Pojačanja su uzrokovala znatno povećanje posmične čvrstoće ziđa, pri čemu je to povećanje bilo veće kod zidova od kamena nego zidova od opeke. Nadalje, kod debljih zidova, odnosno manjega omjera debljine pojačanja i debljine ziđa, povećanje posmične čvrstoće bilo je manje. Krutost pojačanih zidova u odnosu na nepojačane znatno se povećala, ali se kapacitet deformacija smanjio s obzirom na nepojačane uzorke. Nelinearna analiza metodom konačnih elemenata u odnosu na eksperimentalne rezultate u tom istraživanju dala je otprilike 20 % konzervativnije rezultate.

Problem koji se javlja kod pojačavanja zidova na posmik veza je između pojačanja i ziđa. Ona se može poboljšati mehaničkim sidrenjem slojeva TRM - a za ziđe. U ispitivanju [14] uzoraka zidova pojačanih GTRM - om bez mehaničkoga sidrenja s jedne i s obje strane zidova pokazano je da zidovi pojačani s GTRM - om s obje strane imaju gotovo 3 puta veću nosivost. Prve, male pukotine javljaju se uzduž tlačne dijagonale te se šire s povećanjem sile dok se pojačanje ne odvoji od zida. Pojačanje s jedne strane uzrokovalo je povećanje krutosti samo na pojačanoj strani. Na nepojačanoj strani javile su se pukotine i deformacije pri mnogo manjoj sili nego na pojačanoj strani do dijagonalnog otkazivanja nepojačane strane i sloma izvan ravnine u isto vrijeme zbog razlike u krutostima na stranama zida. Konačna nosivost u odnosu na nepojačani uzorak veća je 1,6 puta. Istaknuta je potreba sidrenja jednoga sloja TRM pojačanja zbog preranog odvajanja koje ne dozvoljava potpunu iskoristivost pojačanja. I na malim uzorcima ziđa (engl. walletes) [17] pojačanja s jedne strane ne pridonose povećanju posmične čvrstoće, iako je duktilnost povećana, što je važno, jer je često pri horizontalnom djelovanju duktilnost kritični parametar.

U [15, 16] ispitivani su zidovi od opeke (slika 5.) i betonskih blokova pojačani s jednim ili sa četiri sloja CTRM - a postavljenim s obje strane zida bez sidrenja. U odnosu na nepojačane zidove čvrstoća se povećala 2,4 – 4,7 puta ovisno o broju slojeva za zidove od opeke i 2,0 – 2,4 puta za zidove od betonskih blokova. U usporedbi sa CFRP - om u odnosu na kalibrirani koeficijent armiranja $\omega_f = \rho E_f / E_m$, pri čemu je ρ omjer površine pojačanja i površine ziđa, E_f modul elastičnosti FRP - a ili TRM - a i E_m modul elastičnosti ziđa, povećanja posmične čvrstoće su slična. Kod elemenata s kalibriranim koeficijentom armiranja većim od 1,5 % za zidove od betonskih blokova i 4 % za zidove od opeke, dolazi do otkazivanja drobljenjem betona u tlačnom kutu, što znači da povećanje tog koeficijenta nema učinka. Povećanje duktilnosti nije proporcionalno povećanju broja slojeva, iako je kod pojačanih zidova veća nego kod nepojačanih. Za pojačane betonske zidove duktilnost je ograničena drobljenjem u tlačnom kutu za jedan i za četiri sloja pojačanja, dok je za opečne zidove ograničena

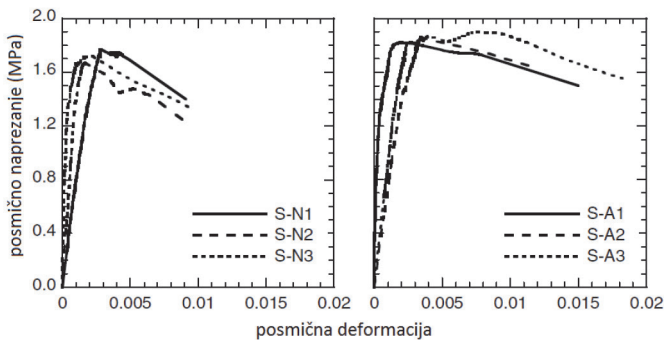
drobljenjem u tlačnom kutu za 4 sloja pojačanja. To proizlazi iz veće krutosti više slojeva pojačanja, što rezultira većom duktilnošću za manji broj slojeva.



Slika 5. Dijagrami posmično naprezanje – deformacija za nepojačane te zidove pojačane s jednim I sa 4 sloja CTRM - a [16]

Uloga sidrenja raspodjela je i prijenos naprezanja sa ziđa na tkaninu. Sidrenje vijcima pomaže u kontroli širina pukotina i poboljšava postkritično ponašanje uzoraka s manjom redukcijom krutosti [17] (slika 6.).

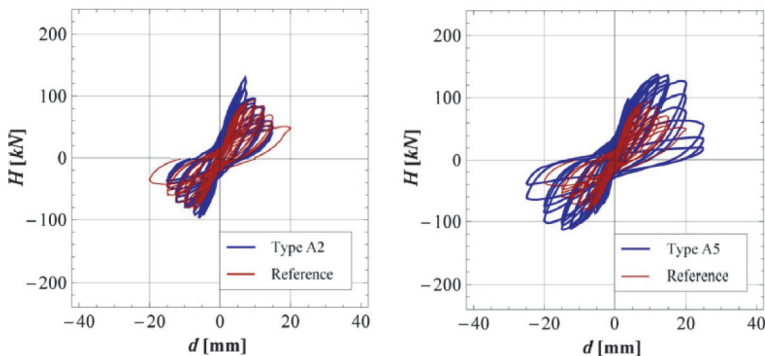
U [18] dan je širi pregled ispitivanja pojačanja s više parametara. Ispitani su neoštećeni i prethodno oštećeni posmični zidovi na cikličko opterećenje s GTRM mrežom postavljenom horizontalno, odnosno vertikalno na cijeloj površini s različitim brojem sidara od ugljičnih vlakana, GTRM mrežom postavljenom dijagonalno na cijeloj površini bez sidrenja te GTRM - om postavljenim dijagonalno s usidrenom mrežom koja nosi vertikalno na krajevima. Ispitan je i uzorak s tanjim slojem morta kao matrice (0,5 mm u odnosu na ostale od 1,5 mm).



Slika 6. Rezultati dijagonalnog testa uzoraka malih dimenzija sa sidrenjem rubne tkanine i bez njega

Na manjim uzorcima ispitana je i veza zidova i pojačanja. Na ispitanim manjim uzorcima koji su otkazali lomom vlakana izvan područja veze zaključeno je da je prionjivost veća od sile koju vlakna mogu preuzeti i s tim se rezultatima ulazilo u numerički proračun. Međutim, numerička analiza nije pokazala zadovoljavajuće rezultate (nu-

merički dobivena nosivost bila je 2 do 5 puta veća od eksperimentalne) osim kod uzorka s dijagonalnom i vertikalnom mrežom, jer je do izvijanja i odvajanja tkanine došlo prije nego su vlakna u tkanini iskorištena, pa se kapacitet vlakana ne može iskoristiti u potpunosti, a nakon odvajanja glavnu ulogu u nosivosti preuzima žiđe. Uzorak s dijagonalnom i vertikalnom mrežom otkazao je dijagonalno posmično kao i nepojačani uzorak. Proizlazi da sidrenje nema zadovoljavajući učinak. Mogući je razlog da sidra trebaju biti postavljena na razmaku koji je otprilike jednak debljini zida. Uzorci s tanjim slojem morta imali su manje povećanje nosivosti i deformacijskoga kapaciteta, kao što je i očekivano. Na slici 7. prikazane su histerezne krivulje sila – pomak uzoraka žiđa sa standardno postavljenom GTRM mrežom bez sidara i sa sidrima na otprilike svakih 55 cm.



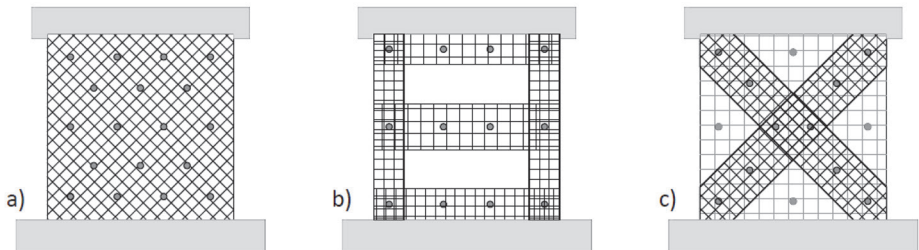
Slika 7. Histerezne krivulje sila – pomak za žiđe s GTRM - om bez sidara (Type A2) i sa sidrima na svakih 55 cm (Type A5)

4 Ciljevi istraživanja

Istraživanje će biti usmjereno ispitivanju ponašanja posmičnih zidova pojačanih GTRM - om opterećenim tlačnim vertikalnim opterećenjem i cikličkim horizontalnim. Uzorci žiđa bit će od pune opeke dimenzija 6,5/12/25 cm. Pokušat će se nabaviti starija opeka kako bi se realnije simulirale postojeće starije građevine. Odnos visine i duljine žiđa bit će otprilike u omjeru 1:1. Ispitivat će se prethodno neoštećeni uzorci. Žiđe će biti pojačano mrežom od staklenih vlakana koja nosi u jednom i u dva smjera, kao cjenovno prihvatljivije rješenje u odnosu na ostali tip vlakana koja će biti usidrena u žiđe pomoću snopova od staklenih vlakana. Osim ispitivanja posmičnih zidova, na manjim uzorcima planiraju se ispitivati i sve upotrebjavane komponente i materijali: zidni elementi, mort za zidanje, mort za matricu, vlakna, ugljična sidra. Bilo bi dobro ispitati i vezu kompozita sa žiđem.

Iako se ovaj tip pojačanja na temelju prethodnih istraživanja pokazao kao učinkovit u smislu povećanja čvrstoće i duktilnosti, mehanizam ponašanja još je nedovoljno istražen zbog širokoga raspona parametara koji utječu na nosivost i otkazivanje zidova. Često se

nosivost vlakana ne može u potpunosti iskoristiti zbog odvajanja pojačanja od podloge ili potrebnoga prevelikog broja sidara što povećava kompleksnost izvedbe, naročito na velikim površinama zidova. Zbog pojave odvajanja teško je procijeniti razinu pojačanja, odnosno kapacitet nosivosti i razinu duktilnosti, i kao posljedica toga mnogi su dosadašnji rezultati prilično kvantitativni. Cilj je spriječiti odvajanje pojačanja od zida kako bi se vlakna što više iskoristila, te kako bi se točnije procijenio doprinos pojačanja i ovisnost različitih parametara (debljine i vrste mortova, gustoća mreže, broj slojeva). Radi sprječavanja odvajanja TRM - a od zida treba proučiti različite konfiguracije pojačanja. Na slici 8. prikazane su moguće konfiguracije pojačanja TRM - om. Na slici 8.a TRM mreža je postavljena dijagonalno na cijeloj površini i usidrena sidrima od staklenih vlakana na otprilike svakih 20 cm, na slici 8.b TRM je postavljen po širini zida te po vertikalnim rubovima, a na slici 8.c TRM mreža je postavljena ortogonalno na cijeloj površini s dodatnim dijagonalnim trakama kako bi se smanjio broj sidara u odnosu na sliku 8.a.



Slika 8. Različite konfiguracije TRM - a u budućem ispitivanju

Također, osim eksperimentalne analize provest će se numerička analiza kojom će se pokušati obuhvatiti različiti parametri koji imaju utjecaj na otpornost zida na posmik. Usporedit će se rezultati tog numeričkog modela s eksperimentalnim rezultatima s ciljem poboljšanja numeričkoga modela za slučajeve koji nisu eksperimentalno ispitani.

5 Zaključak

TRM (mortovi armirani vlaknima) tehnika su pojačanja koja se razvila iz potrebe za poboljšanjem nedostataka kompozita FRP - a koji se posljednjih desetljeća istražuje i primjenjuje u području sanacija konstrukcija. U usporedbi s FRP - om, koji je kompatibilniji s betonom, TRM je bolji za pojačanje zida, što je naročito važno kod pojačanja građevina kulturne baštine. Imaju velik potencijal u povećanju nosivosti i duktilnosti, što potvrđuju prethodna istraživanja pojačanja zidanih, a i betonskih konstrukcija (koja u ovom radu nisu opisana). Općenito se može zaključiti da su pri normalnim temperaturama nešto manje učinkoviti od FRP - a u smislu nosivosti, ali ne u svim slučajevima.

Posebnu pozornost treba posvetiti složenom mehanizmu ponašanja kompozita i načinu njihova otkazivanja. Veza između tkanine i kompozita može se optimizirati pravilnim izborom morta i vlakana, kao i modificiranjem gustoće mreže vlakana. Ta veza zajedno s vezom između matrice i podloge utječe na način otkazivanja i povećanje kapaciteta nosivosti. Zbog toga je potrebno još ispitivanja kako bi se utvrdili i kvantificirali utjecaji različitih parametara na ponašanje kompozita.

Kod pojačavanja zidova, osobito onih koji nisu međuprozorski, pa ih nije moguće potpuno oviti, važno je osigurati puno kompozitno djelovanje kako bi vlakna bila što više iskorištena. Zbog toga treba proučiti načine sidrenja, optimalan broj i raspored sidara, vrstu i debljinu morta matrice, broj slojeva tkanine i različite konfiguracije tkanine.

Osim potrebnih eksperimentalnih ispitivanja, nužno je unaprjeđivati numeričke modele koji predviđaju kapacitet nosivosti i uporabivosti ovoga načina pojačanja neoštećenih i prethodno oštećenih elemenata.

Daljnijim eksperimentalnim i numeričkim analizama bit će moguće razviti pouzdane modele i jednostavnije proračune, koji bi se onda mogli uvesti u buduće smjernice i norme, te bi time bili dostupni inženjerima za primjenu u praksi.

Literatura

- [1] Sorić, Z.: Povijest zidanih konstrukcija, Zidane konstrukcije, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, pp. 1 - 12, 2016.
- [2] Bruneau, M.: State - of - the - Art Report on Seismic Performance of Unreinforced Masonry Buildings, *Journal of Structural Engineering*, 120 (1994) 1, pp. 230 - 251
- [3] Kalali, A., Kabir, M. Z.: Experimental response od double - wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests, *Engineering Structures*, 39 (2012), pp. 24 - 37
- [4] D'Ambrisi, A., Focacci, F.: Flexural strengthening of RC beams with cement based composites, *Journal of Composites for Construction*, 15 (2011) 5, pp. 707–720
- [5] Elsanadedy, H.M., et al.: Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar – Experimental and numerical study, *Composite Structures*, 97 (2013), pp. 40 - 55
- [6] Awani, O., El Refai, A., El - Maaddawy, T.: Bond characteristics of carbon fabricreinforced cementitious matrix in double shear tests, *Constuction and Building Materials*, 101 (2015), pp. 39 - 49
- [7] Ombres, L.: Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete, *Composites: Part B*, 69 (2015), pp. 418 - 426

- [8] Raoof, S.M., Koutas, L.N., Bournas, D.A.: Bond between textile - reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation, *Composites: Part B*, 98 (2016), pp. 350 - 361
- [9] Triantafillou, T.: Mechanical properties, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Elsevier Science & Technology, pp. 363 - 364, 2016.
- [10] ACI Committee 549.4R (2013), *Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric - Reinforced Cementitious Matrix Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures (ACI 549.4R - 13)*, ACI, Farmington Hills, 2013.
- [11] Rahman, A., Ueda, T.: In - Plane Shear Performance of Masonry Walls after Strengthening by Two Different FRPs, *Journal of Composites for Construction*, 20 (2016) 5
- [12] Papanicolaou, C.G., et al.: Textile - reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in - plane cyclic loading, *Materials and Structures*, 40 (2007) 10, pp. 1081 - 1097
- [13] Corradi, M., et al.: Shear strengthening of wall panels through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids, *Composites: Part B*, 64 (2014), pp. 33 - 42
- [14] Yardim, Y.: Shear strengthening of unreinforced masonry wall with different fiber reinforced mortar jacketing, *Construction and Building Materials*, 102 (2016), pp. 149 - 154
- [15] Babaeidarabad, S., et al.: Shear strengthening of un - reinforced concrete masonry walls with fabric - reinforced - cementitious - matrix, *Construction and Building Materials*, 65 (2014), pp. 243 - 253
- [16] Babaeidarabad, S., et al.: URM walls Strengthened with Fabric - Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to Diagonal Compression, *Journal of Composites for Construction*, 18 (2014) 2
- [17] Sagar, S.L., et al.: Diagonal Shear and Out - of - Plane Flexural Strength of Fabric - Reinforced Cementitious Matrix - Strengthened Masonry Wall, *Journal of Composites for Construction*, 21 (2017) 4
- [18] Gams, M., Tomažević, M., Berset T.: Seismic strengthening of brick masonry by composite coatings: an experimental study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017.

Analiza seizmičkog opterećenja ispune silosa prema Eurocodu 8

Zlatko Belošević¹, prof.dr.sc. Mladen Meštorvić²

¹ Ured ovlaštenog inženjera građevinarstva, belosevic.zlako@kr.t-com.hr

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

Sažetak

Cilj istraživanja je odrediti ili poboljšati proračunske metode za procjenu utjecaja dinamičkog djelovanja na konstrukciju silosa, prema europskim propisima za protupotresno projektiranje Eurocoda 8. Želja je odrediti korektni proračunski model za analizu konstrukcije silosa. Na temelju takvih proračuna mogu biti definirane propisane kombinacije i faktori za opterećenje silosa.

Gljučne riječi: silos, potresna pobuda, dinamički odziv, inercijalne sile, nelinearnost, numeričko modeliranje

Seismic load analysis of material-filled storage tanks according to Eurocode 8

Abstract

The objective of the current research is to determine or improve calculation methods for estimating influence of dynamic load on storage-tank structures according to Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake resistance. The intention is to define an accurate calculation model for the analysis of silo structures. These calculations could be used to regulate silo loading combinations and factors.

Key words: silo, seismic excitation, dynamic response, inertia forces, nonlinearity, numerical modelling

1 Uvod

Poznato je da je za naše područje potresno opterećenje dominantno horizontalno opterećenje na građevinske konstrukcije. Potresi su prirodni događaji koji u sebi kriju velik potencijal štete. Kako bi se ljudski život i inventar zaštitili od posljedica takvih utjecaja, građevine treba dimenzionirati i prilagoditi takvim zahtjevima. Silosi su složeni konstrukcijski sustavi ponajprije zbog velike mase sadržaja. Ponašanje ispune silosa sipkim materijalom pri dinamičkom odzivu potresne pobude nije dovoljno istraženo, izrazito je nelinearno te ne prati formu oscilacije nosive konstrukcije silosa. Posljedica je toga pojava značajnih inercijalnih sila na stijenke silosa, što je vrsta opterećenja kakvoga kod drugih konstrukcija, osim vodotornjeva, realno nema. To dokazuje nedostatak općevažećih postupaka za uzimanje u obzir ponašanja rasutoga materijala i njegove interakcije s građevinom, što ima značajnu ulogu u procjeni dinamičkoga ponašanja cjelokupnog sustava – građevine i rasutoga materijala.

Neka istraživanja (npr. [1]), pokazuju da, ovisno o "vitkosti silosa", stupnju napunjenosti te jačini i frekvenciji ubrzanja potresa, oko 80 % ukupne mase doprinosi dinamičkoj ukupnoj nosivosti. Masa rasutoga materijala može sudjelovati u vibracijama konstrukcije silosa samo u mjeri u kojoj se tijekom potresa aktivira putem unutarnjih sila trenja. Međutim, istodobno se također aktiviraju i svojstva prigušenja ovoga medija. Iako je utjecaj uskladištenih rasutih materijala na prigušenje cjelokupnoga sustava neosporan, do danas nema realnih pokušaja njegova kvantificiranja. Današnje su spoznaje usredotočene oko toga da je kod niskih silosa udio sudjelovanja mase još manji [2, 3]. Očito se kod niskih silosa veliki dio horizontalnih opterećenja odvodi neposredno putem podnoga trenja [4].

2 Metode istraživanja

Istraživanje se planira provesti numeričkom proračunskom analizom ponašanja konstrukcije silosa pri djelovanju potresa [5, 6, 7]. Za ovaj rad u skladu s normom HRN EN 1998-4 točke 3.3 [8] analizirana je usporedba globalnoga odziva na potresno opterećenje, period titranja i pomaci uz pretpostavku da se sadržaj silosa giba zajedno sa stijenkom silosa smještenom u njezinu težištu i učinak odziva krutih čestica preko dodatnoga normalnog tlaka raspodijeljenog na stijenku silosa.

Za numerički je primjer odabran vitki cilindrični armiranobetonski silos promjera 12,0 m, visine 30,0 m sa sadržajem pšenice težine 9,0 kN/m³ ukupnog kapaciteta 2850,0 t. Silos je temeljen na temeljnoj ploči modeliranoj na elastičnim Winklerovim osloncima temeljnoga tla poboljšanog injektiranjem s fiksnim ležajevima po rubu temeljne ploče. Konstrukcija je silosa modelirana metodom konačnih elemenata, i to luskastim elementima.

2.1 Podaci ispune silosa prema EN 1991-4: 2012

- kut rasprostiranja ispune silosa: $\varnothing_r = 34^\circ$
- kut unutarnjeg trenja ispu+ne silosa: $\varnothing_m = 30^\circ, \alpha_\varnothing = 1,12$
- kut trenja stijenke : $\varnothing_w = 30^\circ$
- omjer bočnoga tlaka prema EN 1991-4: 2012 dan je izrazom (1):

$$K_m = 1,1(1-\sin\varnothing_m) = 0,54, \alpha_k = 1,11 \quad (1)$$

- koeficijent trenja stijenke dan je izrazom (2):

$$\mu = \text{tg}\varnothing_w = \text{tg}30^\circ = 0,57, \alpha_\mu = 1,16 \quad (2)$$

- vrijednost vertikalnoga tlaka ispune dana je izrazom (3):

$$P_{ho} = 54,98$$

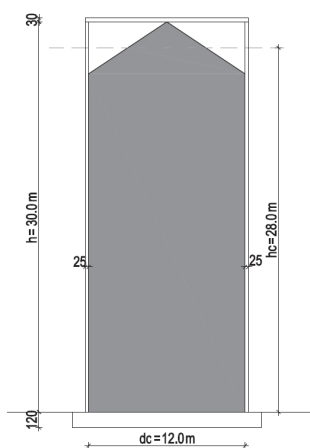
$$P_{vf}(z) = x Y_j(z) = -x 0,9357 = 85,9 \text{ kN/m}' \quad (3)$$

$$K = 0,599$$

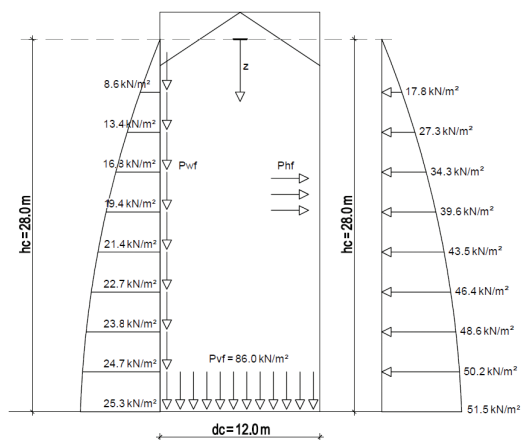
- vrijednost tangencijalnoga naprezanja od trenja ispune dana je izrazom (4):

$$P_{wf(z=26,0m)} = \mu x P_{ho} \cdot Y_j(z) = 0,491 \cdot 54,98 \cdot 0,9357 = 25,3 \text{ kN/m}' \quad (4)$$

Na slici 1. dani su geometrijski podaci o silosu dok su na slici 2. dani dijagrami pritiska od ispune silosa.



Slika 1. Geometrijski podaci o silosu



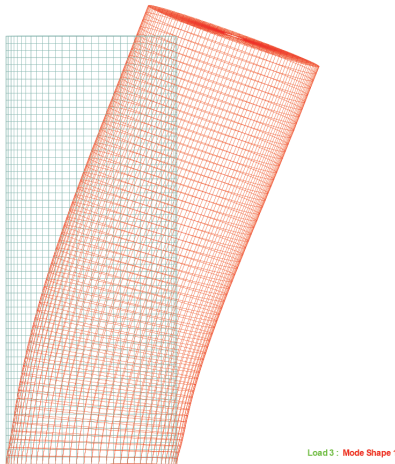
Slika 2. Dijagrami pritiska od ispune silosa

2.2 Globalni odziv konstrukcije silosa na potres uz pretpostavku da se ispuna giba zajedno sa stijenkom

Proračun globalnoga potresnog odziva silosa proveden je modalnom analizom na programom Staad.pro. Utvrđivanje potresnoga opterećenja u skladu je s normom HRN EN 1998-1, [9]:

- prema seizmičkoj karti za povratni period od 475 g za odabrano je područje ubrzanje podloge $a_g = 0,22 \text{ m/s}^2$
- temeljno je tlo kategorije B
- faktor ponašanja za izravno temeljene silose u skladu s normom EN 1998-4 iznosi $q = 1,0$
- masa ispunje silosa zadana je jednoliko po površini stijenske silosa.

Na slici 3. dan je oblik oscilacija prvoga tona silosa dok su na slikama 4. i 5. prikazane vertikalne vlačne i tlačne sile.



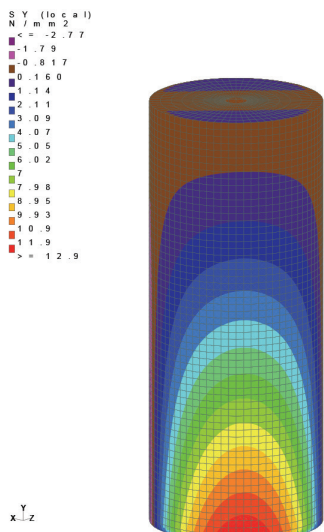
Slika 3. Oblik oscilacija prvoga tona silosa ($T_1 = 0,371 \text{ s}$)

Kontrola vertikalne membranske vlačne sile u kombinaciji opterećenja potresom, [6]:

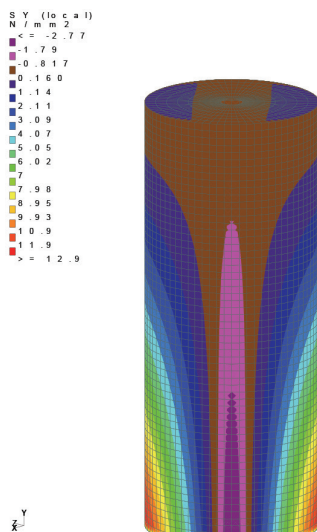
$$N_{y \max} = 12,9 \cdot 1000,0 \cdot 250,0 = 3225,0 \text{ kN (vlak).}$$

Potrebna armatura za preuzimanje vlačnih naprezanja jest $A_s = 37,1 \text{ cm}^2/\text{m}'$ za svaku stranu stijenske.

Ukupna je seizmička sila: $F_{b \text{ staad}} = 15 \text{ 171 kN.}$



Slika 4. Vertikalne membranske sile SY (VLAK)



Slika 5. Vertikalne membranske sile SY (TLAK)

2.3 Komparacija perioda oscilacija i potresne sile dobivenih pojednostavljenim proračunom

Pojednostavljeni proračun prvoga tona oscilacija, prema [10]:

$$d_c = 12,0 \text{ m}, h = 30,0 \text{ m}$$

$$C = 213452,0 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma M = 28480,0 \cdot 0,8 + 7360,0 = 30144,0 \text{ kN}$$

$$f = 1/2\pi \sqrt{C/M} = 0,423$$

$$T_1 = 2,35 \text{ s} > T_{D_0} = 2,0 \text{ s}$$

$a_g = 0,22$ - poredbeno vršno ubrzanje tla za građevinsko tlo klase B u jedinici gravitacijskog ubrzanja

$S = 1,2$ - parametar tla za Tip B

$\beta = 2,5$ - faktor uvećanja spektralnog ubrzanja

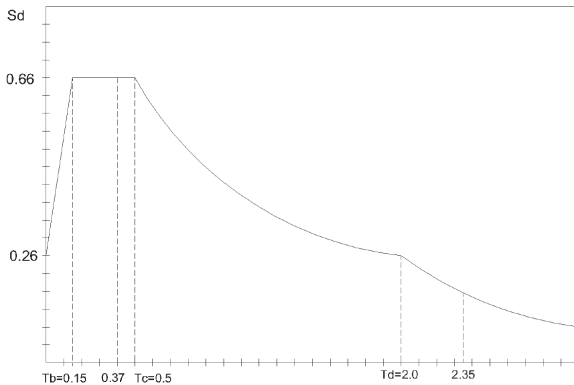
Ordinata proračunskoga spektra za period $T_1 = 2,35 \text{ s}$ dana je izrazom (5):

$$S_d(T_1) = 0,22 \cdot 1,2 \cdot 2,5 \cdot (0,5 \cdot 2,0/2,35^2) = 0,1195 \tag{5}$$

Za linearno elastičan proračun "metodom bočnih sila" na temelju očitane ordinate proračunskoga spektra određuje se ukupna poprečna sila na konstrukciju silosa koja je dana izrazom (6):

$$F_b = S_d(T_1) \cdot W \cdot x/q = 0,1195 \cdot 30144,0 / 1,0 = 3602,0 \text{ kN} < F_{b \text{ staaad}} = 15 \text{ 171 kN} \tag{6}$$

Komparacija perioda oscilacije za prvi ton T_1 , odnosno projektnoga spektra odziva vidljiv je na slici 6.



Slika 6. Oblik projektnoga spektra odziva

2.4 Globalni odziv silosa na potres preko dodatnoga normalnog tlaka na stijenu silosa

Dodatno stožasto opterećenje silosa s kružnim tlocrtom opterećenje je koje u ovom slučaju djeluje po cjelokupnoj visini silosa u radialnom smjeru s povećanjem tlačnih membranskih naprezanja u kombinaciji sa savijanjem.

Dodatni horizontalni tlak na stjenke silosa od potresnog djelovanja ispune silosa dan je izrazom (7):

$$\Delta_{ph,so} = \alpha_z \cdot \gamma \cdot r_s \quad (7)$$

$$r_s = \min(h_b, d_c/2) = \min(30,0; 12,0/2) = 6,0 \text{ m}$$

$$\alpha_{(z)} = 0,22 \text{ m/s}^2, \gamma = 9,0 \text{ kN/m}^3$$

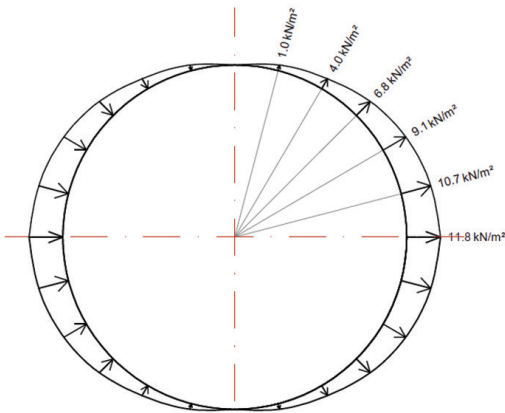
$$\Delta_{ph,so} = \alpha_{(z)} = 0,22 \cdot 9,0 \cdot 6,0 = 11,86 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta_{ph,s} = \Delta_{ph,so} \cdot \cos\theta \quad (8)$$

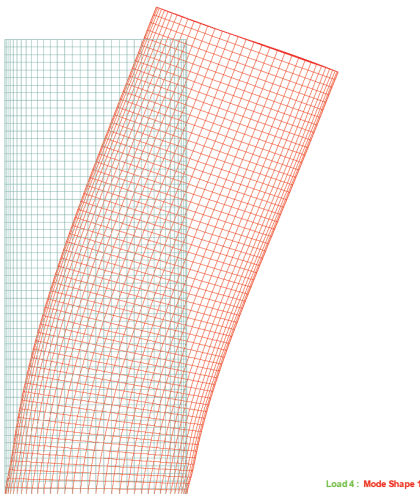
$$\Delta_{ph,s}(0^\circ) = 11,86 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta_{ph,s}(90^\circ) = 0,00 \text{ kN/m}^2$$

Na slici 7. prikazan je dijagram dodatnog horizontalnog pritiska dok je na slici 8 prikazan oblik oscilacija prvoga tona silosa. Vertikalne vlačne sile prikazane su na slici 9., dok su na slici 10. prikazane vertikalne tlačne sile.



Slika 7. Dijagram dodatnoga horizontalnog pritiska $\Delta_{ph,s}$



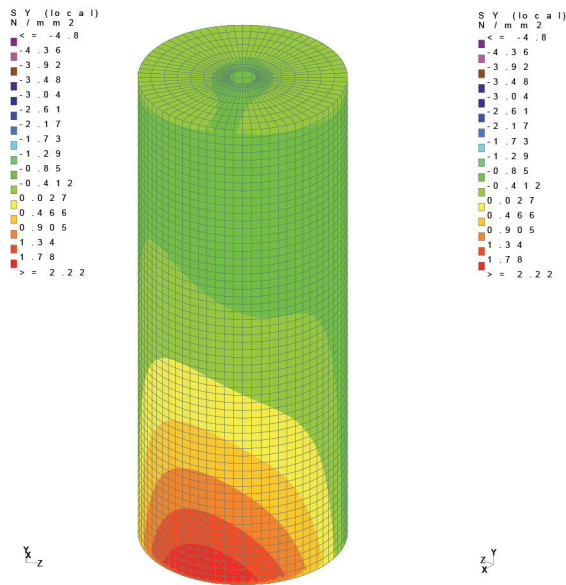
Slika 8. Oblik oscilacija prvoga tona silosa ($T_1 = 0,18$ s)

Kontrola vertikalne membranske vlačne sile u kombinaciji opterećenja s potresom:

$$N_{y \max} = 0,222 \cdot 1000,0 \cdot 250,0 = 55,5 \text{ kN (vlak).}$$

Potrebna je armatura za preuzimanje vlačnih naprezanja $A_s = 1,3 \text{ cm}^2/\text{m}'$.

Ukupna je seizmička sila: $F_{b \text{ staad}} = 3578 \text{ kN.}$



Slika 9. Vertikalne membranske sile SY (VLAK) Slika 10. Horizontalne membranske sile SY (TLAK)

4 Zaključak i smjernice za daljnja istraživanja

Analizom rezultata provedenih za globalni odziv silosa na potres za slučaj s ispunom u 80-postotnom iznosu i praznom silosu s dodatnim horizontalnim pritiskom po stijenci silosa, svedenih na usporedbu vlačnih membranskih naprezanja, perioda titranja i time ukupne potresne sile, pokazuju rezultate koji dosta odstupaju i odlaze u krajnosti. Odziv praznoga silosa s dodatnim horizontalnim pritiscima na stijenke silosa nije dostatan utjecaju inercijalnih sila na stijenke silosa. Globalni odziv punoga silosa s 80-postotnom ispunom previše je gruba aproksimacija ponašanja ispunne silosa, jer su rezultati ekstremni, pa stijenke silosa ne mogu zadovoljiti granično stanje nosivosti.

Kod toga je važno uočiti da period oscilacije konstrukcije silosa izravno utječe na ordinatu proračunskoga spektra. Međutim, bez obzira na to što masa ispunne silosa načelno povećava period titranja i time smanjenje ukupne potresne sile, odnos geometrije, promjera i visine silosa mogu također utjecati na period te time ponovo povećati ukupno potresno opterećenje.

U budućnosti treba prije svega provesti opsežna numerička istraživanja potresnoga djelovanja za razne odnose u geometriji i ispuni silosa te provesti eksperimentalna istraživanja modela silosa u određenom mjerilu radi utvrđivanja ponašanje ispunne za vrijeme potresne pobude te njezina utjecaja na veličinu potresnih sila i period konstrukcije silosa.

Cilj je istraživanja odrediti ili poboljšati proračunske metode za procjenu utjecaja dinamičkoga djelovanja na konstrukciju silosa prema europskim propisima za protu-potresno projektiranje EN 1998-4. Osobito je važno istražiti ponašanje ispune silosa kod potresnoga djelovanja te izraditi numerički model ponašanja konstrukcije silosa u globalnom odzivu potresnoga djelovanja. Na temelju takvih proračuna mogu biti definirane propisane kombinacije i faktori za opterećenje silosa. Znanstveni doprinos istraživanja koji se očekuje parametri su za definiranje smjernica radi kalibracije službenih propisa u području proračuna silosa.

Literatura

- [1] Boswell: Current practica in the analysis and design of bulk storage silos subjected to earthquake motion, In: Sec. Int. Conf. On design of Silos for Strength
- [2] Briassoulis, D.: Cylindrical shells: other actions., In [13], pp. 400–414.
- [3] Hampe, E., Bohn, W., Schwarz, J.: Erdbebenberechnung von Silobauwerken mit der Response-Spektrum und Time-History-Methode. Technische Mechanik, 3 (1982) 3, pp. 66–73.
- [4] Meskouris, K., Hinzen, K.G.: Bauwerke und Erdbeben. Grundlagen – Anwendung – Beispiele, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2003.
- [5] Chopra, A.K.: Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Pearson, 2014
- [6] Beton kalender 2016: 9.3 Erdbeben (Einwirkungen aus außergewöhnlichen Bemessungssituationen nach DIN EN 1998-4, Stefan Ehmman, Hamburg)
- [7] Ghali, A.: Cirkular Storage Tanks and Silos, London and New Yoork, 2000
- [8] Eurocode 8: HRN EN 1998-4 : (EN1998-4:2006) – 4. dio : Silosi, spremnici i cjevovodi (EN1998-1:2006) Design of structures forearthquake resistance – Part 4: Silos, tanks, and pipelines
- [9] Eurocode 8: HRN EN 1998-1 : (EN1998-1:2004+AC:2009) Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija- 1, (EN1998-1:2004+AC:2009) Design of structures forearthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules seismic actions and rules for buildings
- [10] Stahlbau kalender 2013: 5.3.10 Erdbeben (7 silos und Einwirkungen auf silos nach DIN EN 1993-4-1)

Pregled i analiza dosadašnjih modela integracije sustava BIM i ERP

Sonja Kolarić¹, izv.prof.dr.sc. Mladen Vukomanović^{2,1}

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

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

Sažetak

Razvoj tehnologije te sve šira primjena projektno orijentiranih sustava Building Information Modeling (BIM) te sustava Enterprise Resource Planning (ERP) usmjerenih na upravljanje poduzećem zahtijevaju njihovu integraciju. Dosadašnji modeli integracije nisu primjenjivali principe tehnologije BIM u punom obliku te su ograničeni primjenom specifičnih sustava BIM ili ERP. Zaključno, standardni protok informacija kroz sustave još uvijek nije definiran zbog čega će daljnje istraživanje biti usmjereno na modeliranje tijeka informacija između projekta i poduzeća, odnosno sustava BIM i ERP.

Ključne riječi: građevinska industrija, projekt, BIM, poduzeće, ERP, modeli integracije

Overview and analysis of current BIM and ERP integration models

Abstract

Technology developments and widespread application of project-oriented Building Information Modelling (BIM) and Enterprise Resource Planning (ERP) systems, directed toward enterprise management, will necessarily require their integration. Current integration models have not made full use of the BIM technology principles, and have been limited by application of specific BIM or ERP systems. It may be concluded that standard information flow through systems still remains undefined, and that further research will focus on modelling information flow between the project and the company, i.e. between the BIM and ERP systems.

Key words: construction industry, project, BIM, enterprise, ERP, integration models

1 Uvod

Građevinska industrija, a time i većina građevinskih poduzeća, projektno je orijentirana, no s druge je strane neusklađena s novim načinima poslovanja, prijenos je informacija između sudionika gradnje nestandardiziran te su procesi projektiranja, planiranja, upravljanja, izvršenja i kontrole projekta nepotpuni i nedovoljno integrirani. U skladu s time promjene u poslovanju organizacije te restrukturiranje poslovnih procesa predstavljaju kompleksan zadatak koji nerijetko završava neuspjehom. Građevinska poduzeća svoje poslovanje temelje na prolaznim te troškovno, vremenski i lokacijski varijabilnim projektima koji za svoje izvršenje troše različite resurse dostupne unutar promatranoga poduzeća i izvan njega [1, 2, 3]. Pritom je cilj poslovanja svakog građevinskog poduzeća ostvariti ravnotežu između unutarnjih kapaciteta i stvarnoga rada, uz maksimalno iskorištenje vlastitih resursa. Navedeno se može postići na razne načine, npr. unajmljivanjem vanjskih resursa kod povećanoga opsega posla, davanjem u najam vlastitih resursa kod smanjenoga opsega posla, osvajanjem tržišta manjim ponudbenim cijenama itd. U takvoj promjenjivoj projektnoj okolini građevinska poduzeća teško ostaju konkurentna na tržištu [1].

Nadalje, informatizacija je zahvatila gotovo svaku industriju, pri čemu građevinska industrija nije iznimka. Štoviše, kompleksna projektna okolina te sve viši zahtjevi tržišta samo potiču ulazak specifičnih informacijskih sustava u građevinsku struku. Pritom se pod pojmom projektna okolina smatra promjenjivo okruženje projekta koje čine unutarnji čimbenici na razini organizacije (misija, vizija, strategija, zaposlenici, veličina organizacije, itd.) te na razini projekta (projektni tim, projektni menadžer, itd.) i vanjski čimbenici (ekonomsko, političko, tehnološko, pravno i druga okruženja) [4]. Stoga manji stupanj informatizacije pridonosi slabijoj konkurentnosti, težem shvaćanju tržišta i praktički nemogućem širenju poslovanja. U prilog tome idu i podaci iz globalne prognoze za građevinarstvo do 2030. godine [5] prema kojoj će rast obujma izvedenih građevinskih radova, u narednih 15 godina, biti predvođen Kinom, SAD-om te Indijom (57 % ukupnoga rasta). Upravo u tim zemljama informatizacija doseže visoke stupnjeve te one zbog vlastitih potreba diktiraju smjerove daljnjega tehnološkog napretka [6, 7, 8]. Sagledavši stanje u Europi može se reći kako će budući rast biti predvođen Ujedinjenim Kraljevstvom te Njemačkom, no do 2025. godine europsko građevinarstvo još uvijek neće doseći stanje prije krize. Neovisno o tome, navedene europske zemlje također spadaju u svjetske lidere koji vode razvoj informacijskih sustava za potrebe građevinske industrije [6-10]. Tumačenjem razmatrane prognoze može se zaključiti kako će se u narednom periodu velik broj ljudi zapošljavati u građevinskom sektoru te da će u razvoju mnogih svjetskih zemalja upravo građevinarstvo imati važnu ulogu [5]. Navedene će činjenice stoga samo potaknuti daljnju informatizaciju čitavog sektora. U građevinskoj se industriji trenutačno primjenjuje mnogo specijaliziranih računalnih aplikacija za planiranje, kalkulacije, statičke analize, proračun fizike zgrade, požarno inženjerstvo, itd., no razvojem tehnologije Building Information Modeling (BIM) takav

se razvoj usmjerava prema jednoj koncepciji koja objedinjuje rad svih sudionika projekta. Budući da je jedan projekt samo manji segment čitavoga poslovanja građevinskog poduzeća, primjećuje se sve veća primjena sustava Enterprise Resource Planning (ERP) koji daju podršku pravilnom poslovanju poduzeća. Dakle, primjena sustava BIM omogućava stvaranje baze podataka pojedinoga projekta dok primjena sustava ERP omogućava upravljanje bazama podataka svih projekata u kojima promatrano poduzeće posluje.

BIM predstavlja opće prihvaćenu koncepciju koji grupira i polako zamjenjuje dosadašnje alate i pristupe u projektiranju, statičkoj analizi, vremenskom planiranju, procjeni troškova, upravljanju projektima itd. [11, 12]. Pritom se u centru svakoga projekta nalazi BIM model, odnosno zajednička baza podataka koja povezuje sve sudionike u projektu. U centraliziranu bazu podataka, informacije ulaze samo jednom, a potom se napredovanjem projekta ažuriraju, prate i kontroliraju. Koristi su implementacije koncepcije BIM-a sljedeće: smanjenje grešaka i propusta, povećanje suradnje između sudionika tijekom raznih faza projekta, smanjenje ponovnoga rada, troškova i trajanja izvedbe itd. [11, 13, 14]. Važnost tehnologije BIM prepoznale su mnoge države (npr. Velika Britanija, Francuska, Španjolska, Norveška, Finska, Austrija, itd.) koje su njezinu primjenu uvele kao zakonsku obvezu [15, 16]. Također, brojne organizacije (npr. ISO, buildingSMART, itd.) pridaju veliku pažnju razvoju BIM standarda (npr. Industry Foundation Classes (IFC, ISO 16739), BS 1192:2007, PAS 1192-5:2015, itd.) koji pridonose ostvarivanju zamišljenih i očekivanih koristi BIM implementacije.

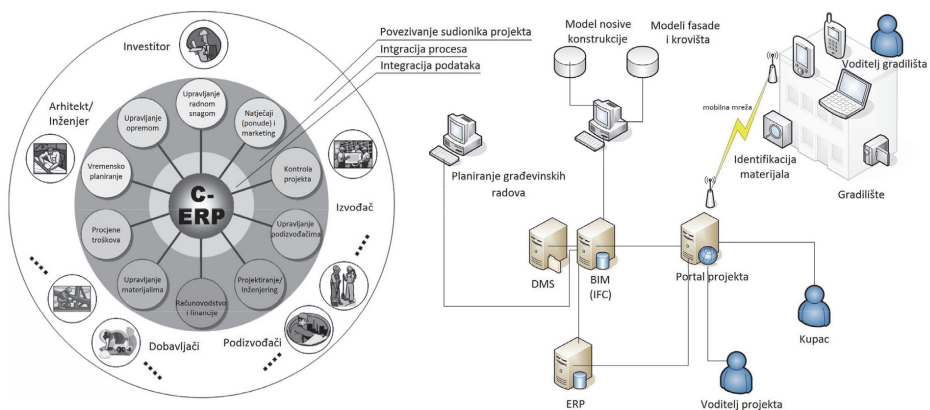
ERP predstavlja sustav za sveobuhvatno planiranje resursa unutar nekog poduzeća, čime sve odjele poduzeća povezuje u jednu integralnu cjelinu [17, 18]. Sustavi ERP razvili su se postupnom evolucijom za potrebe proizvodnje i praćenja lanca opskrbe. Danas se suvremeni sustavi ERP mogu prepoznati u većini srednjih i velikih poduzeća u kojima se upotrebljavaju za organizaciju i automatizaciju poslovnih procesa. Tijekom uporabe sustava ERP u građevinskoj industriji uvidjela se velika potreba za njima, no standardni sustavi ERP nisu bili prilagođeni za potporu poslovanja poduzeća u složenoj projektnoj okolini. Stoga tijekom zadnjih godina započinje razvoj specijaliziranih sustava ERP za potrebe građevinske industrije (eng. Construction Enterprise Resource Planning (CERP) Systems). Identificirani se moduli sustava ERP prilagođenih za građevinska poduzeća (upravljanje radnom snagom, natječaji (ponude) i marketing, kontrola projekta, upravljanje podizvođačima, projektiranje i inženjerstvo, računovodstvo i financije, upravljanje materijalima, procjene troškova, vremensko planiranje, upravljanje opremom [3]) u skladu s raznovrsnom ponudom na tržištu još uvijek ne mogu razmatrati kao standardni.

Dakle, sustavi BIM orijentirani su na projekt dok su sustavi ERP sustavi na poduzeća, zbog čega je teško za očekivati da pojedini od njih preuzima funkcije drugoga. Projekt s jedne strane predstavlja kompleksnu okolinu, no s druge je strane samo mali segment u čitavom poslovanju poduzeća. Trenutno sustavi ERP ne nude održiva rješenja za organizaciju građenja, odnosno ne mogu integrirati sve projektne

informacije. Drugim riječima, primjena je vanjskih aplikacije za procjenu troškova, vremensko planiranje, proračun količina itd. nužna. Budući razvoj spomenutih računalnih aplikacija za organizaciju građenja upućuje na razvoj onih koje podržavaju tehnologiju BIM [2, 19, 20]. Nadalje, za nesmetano je odvijanje procesa u svakom od sustava i transparentne rezultate integracija BIM-a i ERP-a neophodna te će se stoga ovim člankom prikazati njezin potencijal. U prvom će se dijelu dati pregled dosadašnjih istraživanja i predloženih modela integracije sustava BIM i ERP. Kroz diskusiju modeli će se analizirati i međusobno usporediti te će se zaključno dati prijedlog budućega rada i njegov očekivani znanstveni doprinos.

2 Pregled trenutnih istraživanja

Sustavi ERP spadaju u sisteme integrirane projektne isporuke (eng. Integrated Project Delivery (IPD) Systems) [21] te pridonose koncepciji računalno integrirane izvedbe (eng. Computer Integrated Construction – CIC). CIC je standardni termin koji se rabi za istraživanja računalnih rješenja u domeni građevinarstva [22], a bit je čitave koncepcije integracija podataka, informacija i sudionika projekta [3]. Pritom sustavi CERP pridonose ciljevima CIC-a, što je vidljivo na predloženom modelu integracije (slika 1., lijevo). Povezanost poslovnih procesa te sudionika projekta ostvarena je uporabom jednoga integriranog informacijskog sustava s centraliziranom bazom podataka. Pristup informacijama u takvoj je bazi ograničen u skladu s pozicijom svakog pojedinog sudionika u projektu. Informacije u sustav ulaze samo jednom, čime pokreću procese u projektu te poslovne procese unutar poduzeća svakoga interesnog sudionika [3].

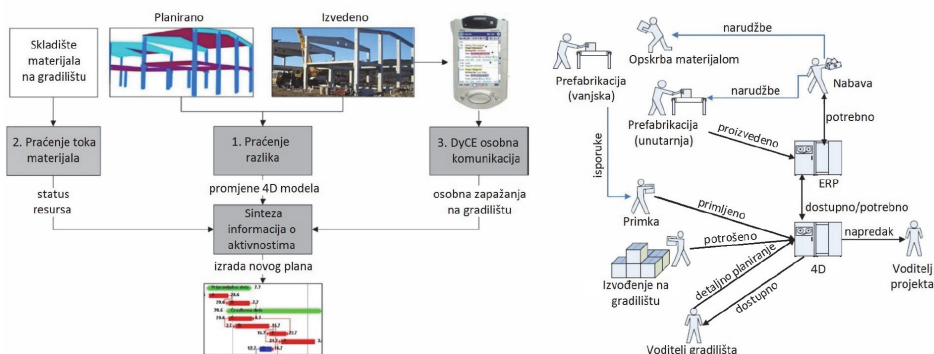


Slika 1. Doprinos sustava CERP ciljevima CIC-a (lijevo) [prilagođeno prema 3] i model integracije CAD alata, sustava ERP i gradilišta kroz BIM model (desno) [prilagođeno prema 23]

Autori Čuš-Babič i dr. (2010; 2014) razvijali su sljedeći model koji je usmjeren na integraciju proizvodnje resursa te izvedbe uporabom BIM-a. Vidljivo je (slika 1., de-

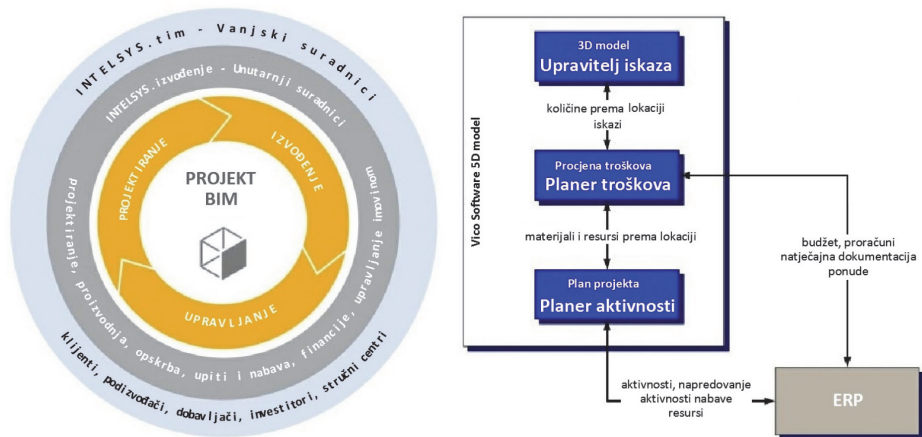
sno) kako se BIM model pomoću CAD alata puni informacijama o projektiranim elementima (pozicija, dimenzije, materijal, ...) te se pomoću aplikacije Microsoft Project svakom 3D objektu pridružuje podatak o njegovu vremenskom izvođenju. Takav model definira procese u sustavu ERP (nabava, proizvodnja, predprodajne aktivnosti, logistika) te na gradilištu (organizacija gradilišta, detaljno planiranje, izvođenje građevinskih radova, praćenje izvršenja projekta, praćenje kretanja materijala na gradilištu). Povratne se informacije o stvarno izvršenim procesima šalju u BIM model te se nakon usporedbe planiranoga i izvršenog stanja, prema potrebi, mijenjaju procesi u svakom od sustava [23, 24].

Nadalje, kako su se dosadašnji sustavi kontrole izvršenja projekta, utemeljeni na indirektnim indikatorima izvršenja aktivnosti (npr. praćenje produktivnost rada, upotrebe opreme, toka materijala, itd.) ili direktnoj procjeni progressa aktivnosti, pokazali kao prilično netransparentni, autori Rebolj i dr. (2008) razvijali su automatizirani sustav praćenja izvršenja projekta utemeljen na 4D BIM modelu. U inicijalnom se modelu (slika 2., lijevo) uporabom triju automatiziranih metoda prikupljaju podaci o izvršenim aktivnostima na gradilištu. Dobiveni se podaci povratno šalju u BIM model, sintetiziraju, provjeravaju i eventualno korigiraju, te se nakon identifikacije realnoga stanja plan prema potrebi revidira. Novi plan postaje početna točka u sljedećem ciklusu kontrole izvršenja projekta, što se ponavlja sve do kraja procesa izvođenja. Fotografiranje stanja na gradilištu te konvertiranje slika u 4D model prva je metoda kojom je omogućena automatska usporedba planiranoga i izvršenog stanja. Druga metoda za prikupljanje podataka utemeljena je na automatskom praćenju toka materijala (slika 2., desno). Proces započinje slanjem informacija o materijalnim potrebama iz 4D BIM modela u sustav ERP, nastavlja se izvršenjem procesa u sustavu ERP te završava praćenjem trenutka dostave i ugradnje materijala na gradilištu. Treća metoda za prikupljanje podataka temelji se na unosu informacija o izvršenim aktivnostima od strane gradilišnog osoblja preko hardverskih alata (eng. *Dynamic Communication Environment – DyCE*) [25].



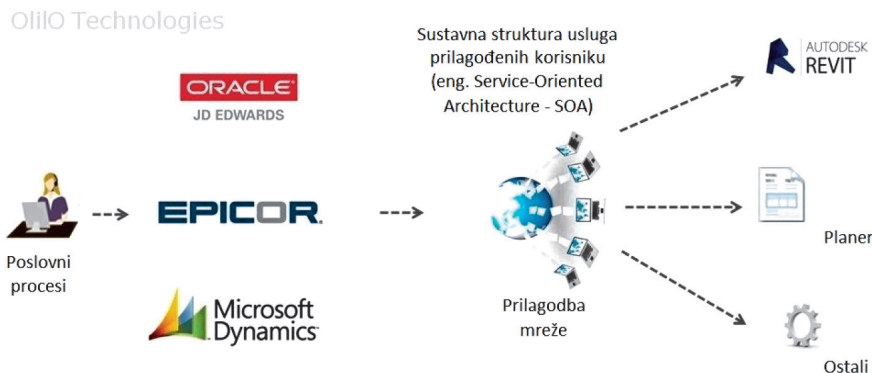
Slika 2. Shema automatiziranoga praćenja izvršenja aktivnosti (lijevo) i model upravljanja lancem opskrbe podržan 4D BIM-om (desno), prilagođeno prema [25]

Holzer (2016) je, kao četvrti razmatrani autor, istraživao povezanost sustava za upravljanje životnim ciklusom proizvoda (eng. Product Lifecycle Management (PLM) sustavi), BIM-a i ERP-a. Sustavi PLM ključni su u fazi projektiranja, kada omogućavaju automatizirano upravljanje promjenama stvarajući ažuriranu i dostupnu bazu podataka o proizvodima, iskazima materijala, specifikaciji proizvoda, inženjerskoj dokumentaciju i dr. [26]. Model integracije proučavao se na studiji slučaja u kojem se protok informacija pokušao ostvariti na način opisan u nastavku. Sustav BIM sustav se rabio za stvaranje baze podataka (3D virtualni objekti s pridruženim atributima) iz koje su se podaci prenosili u PLM sustav. Naknadno je ostvarena integracija sustava PLM i ERP u cilju povezivanja strukture proizvoda i plana proizvodnje [27]. Povrh svega, razvojem specijaliziranih sustava CERP i na tržištu je vidno primijećena drugačija orijentiranost sustava BIM i ERP (projekt, poduzeće) te da je njihova integracija neophodna. 4PS (partner ERP proizvođača Microsoft Dynamics NVD), Metaphorix (dio 4PS grupe) i Vista Viewport ističu kao jednu od karakteristika vlastitoga sustava ERP čitanje BIM modela, odnosno IFC datoteke [28, 29, 30]. INTELSYS daje rješenje povezivanja specifičnih BIM (Revit, Navisworks) i ERP softvera (SAP) (slika 3, lijevo). Unosom Revit familija u SAP omogućen je automatski proračun troškova izvedbe tijekom projektiranja [31], dok integracija SAP-a i Navisworks-a daje sliku budućih procesa nabave i građenja trenutačnoga projekta [32]. U modelu kompanije Vico (slika 3., desno) predviđen je utjecaj informacija u sustavu ERP (planirani budžet poduzeća, natječajna dokumentacija, podloge za procjenu troškova) na stvaranje BIM modela (proračuna količina, procjene troškova, vremenskog planiranja). Dvosmjernom je komunikacijom između navedenih sustava omogućena kontrola i eventualna revizija plana, troškova i planiranih resursa trenutnog projekta te utjecaj na buduće prakse poduzeća [33].



Slika 3. Model integracije prema INTELSYS (lijevo) [prilagođeno prema 34] i prema Vico (desno) [prilagođeno prema 33]

Nadalje, tvrtka Olilo Technologies predlaže model (slika 4.) u kojem se sustav ERP puni rezultatima odvijanja poslovnih procesa, te se stvara centralizirana baza podataka dostupna svim sudionicima. Prilagodnom mreže, informacije se šalju u BIM model i definiraju buduće projekte (projektiranje, planiranje, itd.) [35].



Slika 4. Model integracije prema Olilo Technologies [prilagođeno prema 35]

3 Diskusija

Model integracije prema autorima Tatari i dr. (2008) [3] trenutačno nije ostvariv, jer svako poduzeće praćenje poslovanja obavlja u vlastitom sustavu ERP, dok se BIM model formira za potrebe projekta. Kroz jedan informatički sustav integracija poslovanja svih sudionika, praćenje izvršenja projekta te sagledavanje utjecaja na svako pojedino poduzeće teško se može ostvariti. Tome ide u prilog i privremena ovisnost sudionika koja je vezana na specifičan projekt. Pravilna implementacija novih tehnologija u građevinska poduzeća često zahtijeva restrukturiranje poslovanja i njegovu prilagodbu na novi način rada. Navedeno stvara znatan trošak koji može biti koban za poslovanje poduzeća, zbog čega građevinska poduzeća nerijetko pribjegavaju poslovanju u postojećoj okolini [23, 24]. Autori Čuš-Babić i dr. (2010; 2014) stoga predlažu postupnu implementaciju koncepcije BIM-a u postojeću organizaciju (CAD sustav, postojeći sustav ERP, nedovoljna primjena informatičkih sustava na gradilištu). U razvoju modela upotrijebili su BIM u vrlo jednostavnu obliku u kojemu BIM model nije predstavljao glavno mjesto pohrane podataka (tzv. decentralizirani BIM) [23, 24]. U Holzerovu modelu (2016) u kojem je razmatrana integracija sustava PLM, BIM i ERP također nije zamišljena implementacija BIM-a u potpunosti [27]. Štoviše, nedostaci sustava PLM (nedostatak standarda kod razmjene podataka, nedostatak funkcionalnost za integracijske platforme unutar poduzeća, uglavnom sustavi za upravljanje CAD podacima, teška prilagodba dinamičkom okruženju itd. [36]) uzrokovali su zamjenu sustava BIM (Revit) sustavom CAD (Inventor) jer sustav BIM nije dobro funkcionirao s implementiranim sustavom PLM (Valut). Nadalje, analiza

rizika, u odjelima u kojima je izvršena implementacija predloženoga modela, pokazala je da povezanost između sustava BIM i ERP nije ostvarena, jer centralizirana i u potpunosti integrirana baza podataka, u kojoj sva tri sustava funkcioniraju, nije uspostavljena. Predloženi model integracije Rebolj i dr. (2008) nije mogao biti posve implementiran, jer isti zahtijeva visoki stupanj informatizacije poduzeća te primjenu sustava BIM u potpunom obliku. Nadalje, autori ističu problem nepotpunoga definiranja aktivnosti plana te pridruživanja materijalnih resursa (neusklađenost mjernih jedinica u različitim sustavima) koji ima velik utjecaj na izvršenje projekta i mogućnost njegova praćenja [25]. Također, modeli Rebolj i dr. (2008), Holzer (2016) te Čuš-Babič i dr. (2010; 2014) fokusirani su na poduzeća koja se bave proizvodnjom, te su validirani na studijama slučaja u kojima isto poduzeće projektira, proizvodi te montira prefabricirane elemente [23-25, 27]. Navedena ograničenja zahtijevaju detaljnu razradu i testiranje predloženih modela kod njihove primjene u kompleksnijoj okolini npr. izvođačkom poduzeću. Osim toga, autori Ghos i dr. (2011), razvijanjem okvira integracije kompleksnih sustava za potporu poslovanja poduzeća (kroz integraciju sustava BIM i ERP), ističu kako je problem održive integracije takvih sustava u malim i srednjim poduzećima dobio novu dimenziju. Naime, 90 % poduzeća u građevinskoj industriji mala su i srednja poduzeća [1] koja često nisu upoznata s kompleksnim informacijskim sustavima, te im njihova implementacija predstavlja prevelik financijski izazov, ali i opasnost od slabije konkurentnosti. Predlažu sudjelovanje viših upravljačkih tijela poduzeća kod izrade strategije implementacije sustava, no i samog provođenja integracije [21].

Predloženi modeli integracije sustava BIM i ERP od strane softverskih kompanija [28-33, 35] nepotpuni su jer ne ističu koje informacije te u kojem trenutku zahtijevaju prijenos između sustava, već su usmjereni na isticanje prednosti integracije koju nude (npr. projektanti postaju svjesni postojanja zaliha te utjecaja njihovog proračuna na procese nabave, automatizirana procjena troškova na način da se količine i detalji o materijalima povlače iz BIM modela te im se pridružuje odgovarajući trošak iz ERP sustava itd. [35]). Također, analizom se može zaključiti da je na tržištu ponuđena ograničena integracija određena decidiranim sustavima BIM i ERP, što samo potvrđuje nepostojanje standarda integracije.

4 Zaključak

U ovom smo radu obrazložili da je problem nedovoljne povezanosti upravljanja projektom i poduzećem primjenom novih tehnologija dobio novu dimenziju. Nadalje, analizom smo postojećih modela integracije sustava BIM i ERP pokazali kako se koncepcija tehnologije BIM-a u većini modela ne primjenjuje u svom punom obliku, već predstavlja centraliziranu bazu podataka i mjesto komunikacije sudionika projekta. Također, vidljivo je kako su trenutačna rješenja integracije projekta i poduzeća vezana na specifične sustava BIM ili ERP, pa se može zaključiti kako standardni pro-

tok informacija kroz sustave još uvijek nije definiran. Prethodnim tekstom mogu se potvrditi izazovi integracije sustava BIM i ERP prema autorima Ghos i dr. (2011): BIM i ERP sustavi trenutačno nisu integrirani te njihovim bazama podataka upravljaju odvojene grupe koje također nisu međusobno integrirane, sustavi i tehnologije koje se primjenjuju s vremenom se mijenjaju, sistemi koji se primjenjuju moraju raditi u promjenjivoj poslovnoj okolini [21].

Stoga će daljnje istraživanje biti usmjereno na modeliranje informatiziranoga komunikacijskog kanala između poduzeća i projekta. Drugim riječima, žarište će budućega rada biti definiranje standardnog tijeka informacija između projektnih funkcija te poslovnih procesa u poduzeću, podržanoga koncepcijom BIM-a. Pritom će se pratiti utjecaj modela na određene varijable projekta i poduzeća koje će budućim istraživanjem biti određene. Zaključno, očekivani je znanstveni doprinos rješavanje problema komunikacije između projekta (gradilišta) i poduzeća podržane aktualnim informatičkim sustavima. Nadalje, prilagođeni će model, specifičnostima vlastitoga poduzeća, građevinska poduzeća moći rabiti kako bi ostvarila poslovanje podržano BIM tehnologijom, što danas mnogima predstavlja veliki izazov.

Literatura

- [1] Shi, J. J., Halpin, D. W.: Enterprise resource planning for construction business management, *Journal of Construction Engineering and Management*, 129 (2003) 2, pp. 214-221.
- [2] Mêda, P., Sousa, H.: Towards Software Integration in the Construction Industry—ERP and ICIS Case Study, *Proceedings of the CIB W.*, 78 (2012).
- [3] Tatari, O., Castro-Lacouture, D., Skibniewski, M. J.: Performance evaluation of construction enterprise resource planning systems, *Journal of Management in Engineering*, 24 (2008) 4, pp. 198-206
- [4] Projektna okolina, <https://documents.tips/documents/4-projektna-okolina-upravljanje-promjenama.html> (posjećeno 24.08.2017.)
- [5] Global Construction 2030., <http://www.pwc.com/gx/en/industries/engineering-construction/publications/global-construction-2025.html> (posjećeno 23.07.2017.)
- [6] BIM in USA, https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/solutions/bim/Business_value_of_BIM_2012_North_America.pdf (posjećeno 23.07.2017.)
- [7] BIM in China, https://www.construction.com/market_research/bimchina/bimchina.asp (posjećeno 23.07.2017.)
- [8] BIM in India, <https://www.slideshare.net/Be2campadmin/bim-12290094> (posjećeno 23.07.2017.)
- [9] BIM in UK, <https://www.thenbs.com/knowledge/nbs-national-bim-report-2017> (posjećeno 23.07.2017.)

- [10] BIM in Germany, <http://cobuilder.co.uk/bim-in-germany/> (posjećeno 23.07.2017.)
- [11] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K.: BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons, 2011.
- [12] Kymmell, W.: Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations, McGraw-Hill, 2008
- [13] Holness, G.: Future Direction of the Design and Construction Industry: Building Information Modelling, ASHARAE Journal, 48 (2006) 8, pp. 38-46
- [14] Salleh, H., Phui Fung, W.: Building Information Modeling application: focus-group discussion, GRAĐEVINAR, 66 (2014) 8, pp. 705-714
- [15] BIM Levels, <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-levels-explained> (posjećeno 23.07.2017.)
- [16] Hore, A.V., Scott, L., Wes, R., Tibaut, A.: Benefits of inter-institutional collaboration in the delivery of BIM education in Ireland: Reflections of an Irish masters program, Proceedings of the Academic Interoperability Coalition: 10th BIM Academic Symposium, Orlando, Florida, pp.152-164, 2016.
- [17] Vuković, A., Džambas, I., Blažević, D.: Development of ERP Concept and ERP System, Engineering Review, 27 (2007) 2, pp. 37-45.
- [18] Rashid, M.A., Hossain, L., Patrick, J.D.: The evolution of ERP Systems: A historical perspective in Enterprise Resource Planning: Global Opportunities and Challenges, Idea Group Publishing (2002), pp. 1-16.
- [19] Gulliksen, T.: Interoperability between ERP System and Project Planning System, MS thesis, NTNU - Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [20] Santos, E.T.: BIM and ERP: finding similarities on two distinct concepts, 5th CIB W102 Conference: Deconstructing Babel: Sharing Global Construction Knowledge, Rio de Janeiro, 2009.
- [21] Ghosh, S., Negahban, S., Kwak, Y. H., Skibniewski, M. J.: Impact of sustainability on integration and interoperability between BIM and ERP-A governance framework, Technology Management Conference (ITMC), IEEE International, pp. 187-193, 2011
- [22] Boddy, S., Rezgui, Y., Cooper, G., Wetherill, M.: Computer integrated construction: A review and proposals for future direction, Advances in Engineering Software, 38 (2007) 10, pp. 677-687.
- [23] Čuš-Babič, N., Rebolj, D., Nekrep-Perc, M., Podbreznik, P.: Supply-chain transparency within industrialized construction projects, Computers in Industry, 65 (2014) 2, pp. 345-353.

- [24] Čuš-Babič, N., Podbreznik, P., Rebolj, D.: Integrating resource production and construction using BIM, *Automation in Construction*, 19 (2010) 5, pp. 539-543.
- [25] Rebolj, D., Čuš-Babič, N., Magdič, A., Podbreznik, P., Pšunder, M.: Automated construction activity monitoring system, *Advanced engineering informatics*, 22 (2008) 4, pp. 493-503.
- [26] ERP and PLM, <http://www.innofour.com/8733/news/latest/erp-and-plm-defining-the-ir-roles-and-creating-a-collaborative-environment-for-success> (posjećeno 23.07.2017.)
- [27] Holzer, D.: Fostering the link from PLM to ERP via BIM, *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 75-82, 2014.
- [28] 4PS, <https://www.4ps.nl/en/news/4ps-bim-bridge-integrate-bim-with-erp-video-n-143> (posjećeno 23.07.2017.)
- [29] Metaphorix, <http://www.metaphorix.co.uk/bim-and-erp-integration/> (posjećeno 23.07.2017.)
- [30] Vista, <http://blog.capterra.com/comparison-of-5-construction-erp-software-options/> (posjećeno 23.07.2017.)
- [31] Revit and SAP, <http://www.intelsys.eu/solutions/revit-sap-integration/#screenshots> (posjećeno 23.07.2017.)
- [32] Navisworks and SAP, <http://www.intelsys.eu/solutions/navisworks-for-sap/#screenshots> (posjećeno 23.07.2017.)
- [33] Vico, http://www.vicosoftware.com/blogs/vicos_flying_dutchman/topic/bim-outputs-feed-erp (posjećeno 23.07.2017.)
- [34] INTELSYS, <https://i.ytimg.com/vi/bJXFEbM8LFC/maxresdefault.jpg> (posjećeno 23.07.2017.)
- [35] Olilo, http://www.olilo.ae/revit_erp_integration.html (posjećeno 23.07.2017.)
- [36] Jupp, J. R., Singh, V.: Similar concepts, distinct solutions, common problems: learning from PLM and BIM deployment, *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.

Pregled i analiza područja upravljanja interesnim sudionicima u velikim građevinskim projektima

Kristijan Robert Prebanić¹, doc.dr.sc. **Ivana Burcar Dunović²**

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za organizaciju građenja, kprebanic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za organizaciju građenja, iburcar@grad.hr

Sažetak

Veliki građevinski projekti utječu na velik broj interesnih sudionika koji mogu imati različite interese, potrebe i zahtjeve, te postoji realna opasnost od stvaranja opozicije i ugrožavanja izvršenja projekta. Razvijeni su razni alati i metode za analizu, identifikaciju i uključivanje interesnih sudionika, no voditelji građevinskih projekata još uvijek imaju problema i ne uspijevaju zadovoljiti brojne projektne interesne sudionike. Stoga se u velikim građevinskim projektima javlja potreba za sveobuhvatnim smjernicama koje bi voditeljima projekata omogućile sustavnu analizu (interesa, potreba, stavova...) interesnih sudionika na temelju koje bi se formirala ispravna strategija uključivanja interesnih sudionika u projekt.

Ključne riječi: analiza interesnih sudionika, uključivanje interesnih sudionika, veliki građevinski projekti

Overview and analysis of stakeholder management topic on major construction projects

Abstract

Large construction projects affect a considerable number of stakeholders who may have differing interests, needs and requirements, and there is a real danger of creating opposition and endangering project execution. Various tools and methods have been developed for the analysis, identification and engagement of stakeholders. However, construction project managers still have the problem of meeting demands of numerous stakeholders. Therefore, on major construction projects, there is a need for elaboration of comprehensive guidelines that would enable project managers to systematically analyze relevant features of stakeholders (their interests, needs, attitudes, etc.), on which basis a proper strategy for stakeholder engagement on the project would be formed.

Key words: stakeholder analysis, stakeholder engagement, large construction projects

1 Uvod

Upravljanje projektima (UP) možemo definirati kao: "... *planiranje, organizaciju, monitoring i kontrolu svih aspekata projekta ... unutar dogovorenog vremena, troškova i kriterija izvršenja*" [1]. Glavna su pretpostavka te djelatnosti projekti čije su glavne odrednice privremenost, jednokratnost, ograničenost vremena i resursa i timski rad [1]. Pod projektima se u području upravljanja građevinskim projektima podrazumijeva razdoblje od pojave ideje o gradnji do početka uporabe građevine, a u nekim slučajevima čak i do njezina rušenja. Mnoga istraživanja pokazala su da postoje veliki problemi u učinkovitosti UP: "*Istraživanje Svjetske banke provedeno na oko 1,600 projekata ukazuje na 70 %-tno prosječno prekoračenje početno planiranog roka kod čak 88 % projekata. Istraživanje provedeno u Hrvatskoj u razdoblju od 1996.-1998. ukazuje na 60 %-tno prekoračenje vremena u fazi građenja kod 78 % od ukupno 333 razmatrana projekta*" [2, 3]. Upravljanje građevinskim projektima u brojnim slučajevima nije dovoljno učinkovito, te je time otvoren prostor za daljnja istraživanja u cilju razvoja učinkovitosti upravljanja. Učinkovitost upravljanja projektima donedavno se razmatrala isključivo putem "hard" kriterija uspjeha projekta poput vremena, troškova i kvalitete, dok u posljednjih dvadesetak godina u žarište dolaze i "soft" dimenzije uspjeha projekta [4]. Takozvani "soft" kriteriji uspjeha projekta očituju se kroz percepciju zadovoljstva interesnih sudionika uključenih u projekt [4]. Interesni sudionici mogu se definirati kao "... *pojedinci ili grupe koje utječu na projekt ili projekt utječe na njih*" [5], pri čemu je jasno da osim projektnih sudionika koji su vezani ugovorom i imaju jasnu ulogu u projektu postoje i drugi pojedinci ili grupe koji su na neki način povezani s projektom i utječu na njega. Nedostatak volje interesnih sudionika da kontinuirano tijekom izvršenja podupiru viziju projekta i projektne aktivnosti može dovesti do neuspjeha [6], što dovodi do toga da organizacije koje aktivno uključuju interesne sudionike u projekte imaju veći izgled za uspjeh [7] i postizanje određenih dobrobiti poput unaprjeđenja učinkovitosti organizacije te smanjenja gubitaka vremena, novaca i materijala [8]. Za specifično područje upravljanja interesnim sudionicima (dalje u tekstu UIS) u građevinarstvu postoji velik interes istraživača što dokazuje velik broj radova iz tog područja, koji je rezultirao izradom nekoliko preglednih radova [9-11] u zadnjih desetak godina, koji daju sintezu svih postojećih istraživanja i prezentiraju njihov doseg. U navedenim preglednim člancima detektirani su razni smjerovi istraživanja koji su razvrstani u nekoliko kategorija: *analiza interesnih sudionika, procesi upravljanja interesnim sudionicima, strategije uključivanja interesnih sudionika, upravljanje vezama između interesnih sudionika, interesi i utjecaj interesnih sudionika*. Iako je iz navedenoga jasno da postoji velik interes i nemali broj istraživanja, UIS u građevinarstvu ima velike nedostatke i za ovo područje ne postoji vodeći model, alat ili metodologija. Neki autori tvrde da je ovo područje još uvijek u začetku [12], odnosno konstatiraju da je nedovoljno istraženo i da ima veliki istraživački potencijal [13].

U slučaju velikih građevinskih projekata svi navedeni problemi još su kompleksniji zbog vrlo velikoga broja interesnih sudionika i velikog spektra njihovih želja, potreba i interesa, pa je stoga u takvim građevinskim projektima i UIS vrlo kompleksno [10], te postoji velika vjerojatnost da će interesi određenih interesnih sudionika biti suprotstavljeni [14]. Neke od karakteristika velikih građevinskih projekata su: ukupna cijena veća od 100 mil. američkih dolara (razlike u visini iznosa postoje od zemlje do zemlje, autor je izrazio prosjek); donošenje odluka, planiranje i upravljanje u ingerenciji je više aktera; opseg projekta mijenja se tijekom vremena; tehnologija i projektno tehnička dokumentacija u većini slučajeva nisu standardni [15]. Postoje mnogi problemi i nedostaci u ovom području na što upućuju navedeni problemi neučinkovitosti upravljanja projektima kao i problemi čestoga nezadovoljstva šire zajednice (interesnih sudionika) na koju projekt utječe.

Cilj je ovoga rada prikazati aktualna istraživanja i trenutačno stanje u području UIS u velikim građevinskim projektima pregledom literature i diskusijom, odnosno analizirati navedeno područje kojim se bavi buduća doktorska disertacija. Prva dva poglavlja ovoga rada odnose se na pregled literature koji je razdvojen na dva poglavlja, jer se sama tematika upravljanja interesnim sudionicima u velikim građevinskim projektima u nekim segmentima razlikuje od uobičajenih radova u ovom području koji nisu usmjereni na velike projekte. U prvom poglavlju opisuju se specifičnosti UIS velikih građevinskih projekata, te potom slijedi poglavlje koje pruža analizu radova i trenutačno stanje područja UIS u građevinarstvu kroz specifične teme analize i uključivanja interesnih sudionika. Nakon toga slijedi diskusija u kojoj su istaknuti nedostaci dosadašnjih istraživanja, a članak završava zaključkom u kojem su prezentirani cijevi budućih istraživanja i planirani znanstveni doprinos.

2 Specifičnosti velikih građevinskih projekata koji utječu na upravljanje interesnim sudionicima

Veliki građevinski projekti nisu samo uvećana verzija manjih projekata nego potpuno različita vrsta projekata u terminima razine očekivanja, duljine od ideje do gotovoga projekta, kompleksnosti i uključivanja interesnih sudionika [16]. Također, karakterizira ih velika razina nesigurnosti zbog isprepletenosti konzorcija (ili "joint venture") i velikoga broja podizvođača koji dodatno povećavaju njihovu kompleksnost, ali i ukupni broj interesnih sudionika na projektu. Upravljanje interesnim sudionicima velikih građevinskih projekata često spada pod javnu ili korporativnu "governance" (upravljačku) strukturu, jer takve projekte najčešće iniciraju ili velika privatna poduzeća (korporacije) ili država, odnosno velika javna poduzeća. Termin "governance" često u radovima ostaje nepreveden, jer je najprikladniji prijevod upravljanje, a njime se prijevodi riječ "management", pa ga autori stoga ostavljaju izvornom obliku. "Governance" dolazi od riječi "government" (vlada), a Muller [17]

ga opisuje kao okvir za etičko donošenje odluka i menadžerske aktivnosti unutar organizacije koji je baziran na transparentnosti, odgovornosti i definiranim ulogama, te navodi postojanje većega broja definicija ovog pojma. Najčešće se veže uz pojam korporativnoga "governancea", koji OECD [18] definira kao skup uzajamnih veza između menadžmenta, uprave, dioničara i ostalih interesnih sudionika, a upravni odbor zadužen je da uspostavi "governance" strukturu projekata i upravljanja projektima. Spomenuta "governance" struktura predstavlja makroanalitički aspekt upravljanja, dok se s mikroanalitičkog aspekta "governance" projekata između ostalog odnosi na upravljanje odnosima među raznim interesnim sudionicima angažiranim u privremenoj multiorganizaciji, odnosno u projektu [19].

Neke države u sklopu javnih "governance" smjernica za upravljanje propisuju razine uključivanja interesnih sudionika, pa tako Australija [20] propisuje 5 razina: "informiraj, konzultiraj, uključi, surađuj, osnaži", i time postavljaju okvir za postizanje održivoga razvoja ("sustainability"). Tema održivosti u građevinarstvu u posljednjih desetak godina sve je više prisutna, a često je vezana uz upravljanje interesnim sudionicima u velikim infrastrukturnim projektima koji utječu na širu zajednicu. Teorija o interesnim sudionicima ("stakeholder theory") u svojoj je srži komplementarna teoriji održivosti, što je vidljivo kada promatramo njezin nastanak. Tijekom povijesti, područje i djelatnost ekonomije i strateškoga menadžmenta (u SAD-u i Europi) prihvaćalo je vlasnike dionica kao one koji imaju najveća prava pri kreiranju ciljeva i donošenju odluka u projektima ("shareholder theory"), da bi se na Sveučilištu Stanford razvila prva definicija interesnih sudionika ("stakeholders") koji su definirani kao sudionici bez kojih korporacije ne bi preživjele [21]. Time se žarište polako premješta s održivosti profita vlasnika na održivost cijele zajednice. Mnogi istraživači istražuju kako interesni sudionici utječu na projekt, dok se nedovoljno bave razlozima zašto oni djeluju na određeni način, iako se analiza interesnih sudionika kao područje istraživanja bavi tim pitanjima, ona nisu dovoljno sustavno istražena. Radovi koji se bave temom održivosti u građevinarstvu napominju da bi tu analizu trebalo promatrati kroz aspekte održivosti profita, planeta i socijalne (ljudske) zajednice (takozvani koncept 3P, "people", "planet", "profit") [22]. Bal i ostali [6] u svom radu predstavljaju koncepciju održivosti u građevinarstvu: "Fundamentalni koncept održivosti u građevinarstvu je donijeti dugoročnu isplativost, kvalitetu i efikasnost, vrijednost klijentima i korisnicima, istovremeno smanjujući negativne utjecaje na okoliš, i povećavajući ekonomsku održivost" [7], a njihov rad rezultira definiranjem 6 procesa uključivanja interesnih sudionika koji se temelje na toj koncepciji.

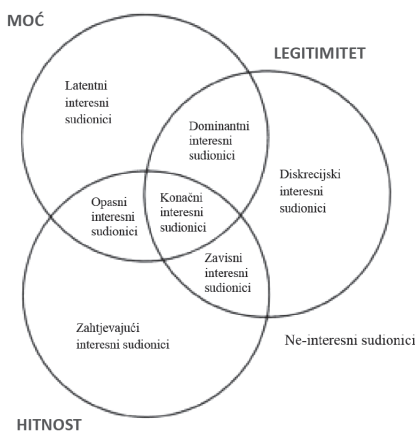
Iako su ove dvije teme vrlo važne za UIS u velikim građevinskim projektima, ipak većina radova iz područja UIS u građevinarstvu razmatra operativno UIS, a ti radovi nisu nužno usmjereni na velike građevinske projekte. Stoga treba pružiti cjelokupan uvid u područje upravljanja interesnim sudionicima prikazujući glavninu istraživanja u ovom području.

3 Analiza područja upravljanja interesnim sudionicima u građevinarstvu

U građevinarstvu se interesni sudionici razmatraju kroz građevinske poslovne sustave, pri čemu se u žarište razmatranja interesnih sudionika stavlja građevinsko poduzeće, ali i kroz upravljanje građevinskim projektima, gdje se interesni sudionici promatraju u odnosu na projekt kao organizacijsku jedinicu. Karlsonov model [23] propisuje sedam procesa upravljanja interesnim sudionicima, gdje je prvi proces identifikacija interesnih sudionika, a zadnja dva su razvoj strategije uključivanja sudionika, te praćenje i kontrola. Bourne i Walker [24] upravljanje interesnim sudionicima razvijaju kroz pet koraka (korak u ovom radu ima vrlo sličnu funkciju kao proces): identifikacija, procjenjivanje, vizualizacija, uključivanje, praćenje i kontrola, a Yang i drugi [25] konstatiraju da su dva najvažnija procesa analiza i uključivanje interesnih sudionika. Neki autori iskazuju sve procese u istoj razini važnosti, a drugi ih razdjeljuju na glavne procese i podprocesse. U ovom će se radu preuzeti kao polazna točka navedena dva glavna procesa, a to su analiza interesnih sudionika i uključivanje tih sudionika u projekt (ovo su ujedno i važne specifične teme unutar područja UIS), te će se na temelju tih procesa prikazati dosadašnji doseg istraživanja.

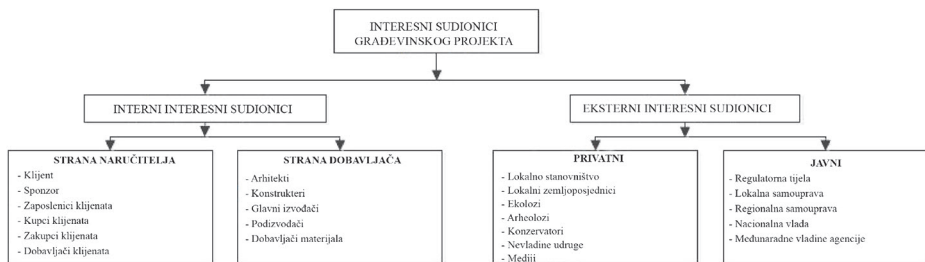
3.1 Analiza interesnih sudionika

Analiza interesnih sudionika, kao što je ranije navedeno, nema univerzalno prihvaćenu definiciju, no dobro objašnjenje dano je u [10]: *"tradicionalna metoda analize interesnih sudionika podrazumijeva kategorizaciju interesnih sudionika i analizu njihovog utjecaja koja se bazira na njihovim individualnim atributima, stavovima, ulogama i predvidljivosti"*. Jedna od prvih klasifikacija i na temelju nje razvijena identifikacija interesnih sudionika bila je Mitchelov model [21] prikazan na slici 1.



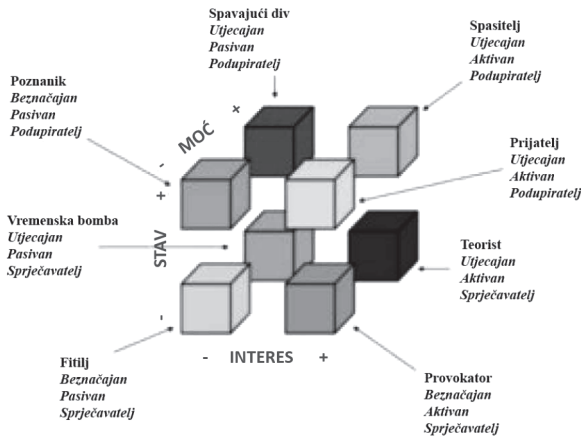
Slika 1. Tipologija interesnih sudionika prema posjedovanju jednoga, dva ili tri atributa, prilagođeno prema [21]

On prikazuje tri atributa interesnih sudionika: snagu, legitimitet i hitnost (reakcije na zahtjev sudionika), te se interesni sudionici klasificiraju na temelju posjedovanja jednoga, dva ili tri atributa. Oni koji posjeduju sva tri atributa nazivaju se konačnim interesnim sudionicima i oni su najkritičniji za projekt. Iako je ova tipologija zamišljena kao model klasifikacije i identifikacije dionika, ovi su atributi upotrijebljeni u mnogim radovima kao varijable koje najčešće poprimaju vrijednosti od jedan do pet, a služe za karakterizaciju interesnih sudionika [26, 27] koji su već identificirani putem nekog drugog modela identifikacije. Olander [26] u svom modelu neposrednoga utjecaja ("impact") interesnog sudionika na projekt na temelju navedenih atributa razvija formulu izračuna utjecaja, gdje osim atributa u formulu dodaje interes i stav interesnih sudionika. Nguyen [27] kritizira i "popravlja" navedeni model, te formira formulu za izračun sveukupnog utjecaja ("influence"). Bourne [23] razvija alat "stakeholder circle" prema kojemu je razvijen i istoimeni računalni program. U tom alatu atribut legitimitet (iz spomenutoga Mitchellovog modela) mijenja se s atributom koji zove blizina ("proximity"), a na temelju tih atributa (ocjene od 1 do 5) formira se krug interesnih sudionika (15 najvažnijih). Površina kruga izražava ukupan utjecaj interesnoga sudionika na projekt. Danas se u građevinarstvu za identifikaciju najčešće primjenjuje neka izvedenica Winchovoga modela [28] koja interesne sudionike dijeli kroz dva nivoa, u prvom na interne i eksterne sudionike projekta, a u drugom nivou podjele interni se dalje dijele na naručitelje i dobavljače, a eksterni na javne i privatne. Neki su od navedenih interesnih sudionika: interni interesni sudionici: klijenti, sponzori, arhitekti, konstruktori, izvođači; eksterni interesni sudionici: lokalno stanovništvo, konzervatori, jedinica lokalne samouprave, regulatorna tijela.



Slika 2. Winchova klasifikacija interesnih sudionika [28]

Osim navedenih modela za analizu interesnih sudionika, matrice su također vrlo raširene kao metode analize. Nastavljajući se na učestale razne oblike dvodimenzionalnih matrice (npr. interes-snaga ili interes-stav), u zadnje se vrijeme razvila i trodimenzionalna matrica snaga-interes-stav (slika 3.) [29]. Ta matrica ima 8 kvadranta, koji predstavljaju 8 kategorija interesnih sudionika. Prema snazi sudionik je **utjecajan ili beznačajan**, prema interesu je **aktivan ili pasivan**, a prema stavu, **podupiratelj ili sprječavatelj**.



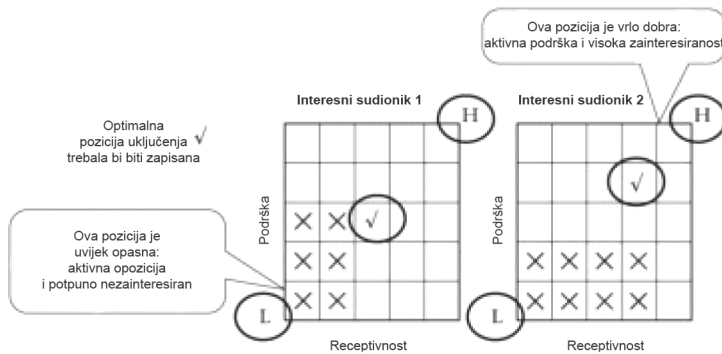
Slika 3. Matrica snaga-interes-stav, prilagođeno prema [29]

Ovdje su navedeni najpoznatiji modeli analize, te u ovom radu nije potrebno detaljnije razmatranje. Analize imaju funkciju pružiti informacije voditelju projekta o interesnim sudionicima, te se na temelju takvih analiza ide dalje u aktivnosti UIS.

3.2 Uključivanje interesnih sudionika i načina postupanja prema interesnim sudionicima

Nakon što je analiza interesnih sudionika napravljena i nakon što su oni razvrstani po kategorijama, dolazi proces uključivanja interesnih sudionika u projekt. Uključivanje interesnih sudionika razvija se kao tema većinski zbog eksternih interesnih sudionika koji nisu ugovorno vezani i izvorno često nemaju (prepoznatljivi) legitimitet, već o voditelju projekta ovisi koliko će ih uključiti u projekt. Samo uključivanje interesnih sudionika ("stakeholder engagement") možemo definirati kao: "*komuniciranje, uključivanje i razvijanje veza s interesnim sudionicima*" [24]. U radu [30] intervjuirani voditelji projekta detektirali su četiri strategije postupanja prema interesnim sudionicima: *zadržavanje, obrana, kompromis i pristanak*, što prikazuje raspon od potpunoga zanemarivanja do bespogovornog ispunjavanja zahtjeva interesnih sudionika. Isti autori u dva rada [24, 30] svoje strategije pristupa interesnim sudionicima sagledavaju kroz stupnjeve uključivanja interesnih sudionika: *informiraj, konzultiraj, uključi, surađuj, osposobi (opunomoći)*, koje propisuje australska vlada (prvi autor članaka dolazi iz te zemlje) [20], odnosno njezin odjel za održivi razvoj i okoliš. Rad koji se bavi operativnim pristupima uključivanja interesnih sudionika u Ujedinjenom Kraljevstvu [8] prezentira *temeljne pristupe (sistematični pristup, podrška "top" menadžmenta, pro aktivnost...)* i *operativne pristupe (efektivna komunikacija, ustupci, pregovaranja...)*, a zaključuje se da je potrebno razviti sustavan okvir postupanja i da se ovi navedeni pristupi nadopunjuju i isprepliću u praksi.

Na temelju alata za analizu interesnih sudionika "stakeholder cicle" [23], spomenu-toga u prethodnomu paragrafu, autori su dalje razvili matricu podrška-receptivnost, gdje se svakom interesnom sudioniku oblikuje profil uključenja u projekt kroz dva koraka. Prvi korak je definiranje trenutne pozicije stupnja uključenja, a drugi željene (optimalne) pozicije stupnja uključenja (slika 4.) koje zajedno tvore profil uključenja interesnoga sudionika. Na temelju prvoga koraka formiraju se komunikacijske strag-tije i prati se njihovo izvršenje.



Slika 4. Profili uključenja sudionika u projekt, prilagođeno prema [23]

Yang i Shen [30] su razvili okvir UIS u građevinskim projektima koji obuhvaća i siste-matizira mnoge različite poglede. Ovaj okvir povezuje analizu interesnih sudionika s njihovim uključivanjem, te praćenjem i kontrolom, uzimajući u obzir kontinuiranu podršku svim procesima upravljanja interesnim sudionicima. Kao što je ranije navedeno, uključivanje interesnih sudionika razrađeno je kroz strategiju pristupa i stupanj uključenja, a nalazi se u procesu donošenja odluka. Taj okvir sastoji se od: **preduvjeta** - upravljanje s obvezom poštivanja ekonomskih, pravnih, okolišnih, etičkih i kulturoloških aspekata, **4 procesa** - identifikacija interesnih sudionika, eva-luacija njihovih karakteristika, donošenje odluka, akcija i kontrola, te **kontinuirane podrške tim procesima**. Svaki od tih procesa sadrži određene aktivnosti i ima defini-rane isporuke u vidu dokumenata i izvještaja što predstavlja veliki napredak u ovom području.

4 Diskusija

Pitanje koga treba smatrati interesnim sudionikom, gdje postoje razlike između širokoga shvaćanja [6] (svi koji utječu na projekt i na koje projekt utječe) i uskog [31] (samo oni koji imaju određeni rizik u projektu), već je prvi znak nestandardiziranosti ovog područja, što uzrokuje određene probleme u svim istraživanjima koja pokušavaju razraditi generički model za UIS. Analiza interesnih sudionika kao područje

prilično je istraženo, no veliki je problem u tome što različiti modeli analize detektiraju različite karakteristike interesnih sudionika, neki pripisuju interesnim sudionicima moć, interes i stav [29], a drugi se naslanjaju na Mitchellov model moći, legitimiteta i hitnosti [31]. To predstavlja vrlo veliki problem, jer nepostojanje vodećega modela i nepostojanje usporedbe postojećih modela doprinosi nestandardiziranosti, odnosno pristup ne može biti sustavan, jer se daljnji koraci i procesi razrađuju na temelju pojedinih analiza, te se ne uzimaju sve postojeće karakteristike u obzir. Također, veći naglasak u UIS u velikim projektima treba staviti na uporabu metode SNA ("Social network analysis") [10] koja je vrlo dobar alat za detektiranje i određivanje prirode veza između interesnih sudionika. U području uključivanja interesnih sudionika postoji nekoliko problema koji otežavaju sustavno uključivanje interesnih sudionika u projekt. Jedan je od problema to što postoji razmjerno malo istraživanja koje se bave strategijama uključivanja interesnih sudionika, a u radu [30], koji donosi okvir UIS u građevinarstvu, strategije su detektirane na temelju intervjuiranja određenoga broja voditelja projekata iz dvaju zemalja, što je premali uzorak za zaključivanje. Praktični pristupi uključivanju interesnih sudionika, koji su detektirani u dva navedena rada [9, 30], prikazuju vrlo detaljan pregled temeljnih i operativnih pristupa koji se primjenjuju u teoriji i praksi, no autori zaključuju da treba primijeniti nekoliko pristupa u isto vrijeme, te ne pružaju analizu koje pristupe treba primijeniti zajedno i zašto. Okvir UIS razvijen u radu Yang i Shen [30] pruža kvalitetnu sintezu svih znanja i dosega u ovom području, te strategije i stupnjeve uključivanja interesnih sudionika postavlja nakon analize, ali bez razrade povezanosti između strategije i analize interesnih sudionika, čime je vrlo teško razabrati kojim se strategijama koristiti u pojedinom slučaju.

Vodeće države i međunarodna udruženja [18, 20] razvijaju modele "governance" struktura upravljanja projektima, gdje propisuju uključivanje interesnih sudionika, te postavljanje sustava UIS, ali često su ti modeli prilagođeni za određenu državu ili za određene vrste projekata, pa postoji velika potreba dodatne analize i sinteze tih "governance" struktura i režima. Ovo potvrđuju i mnogi radovi koji govore o potrebnom većem uključenju "top menadžmenta" [30], odnosno većoj uključenosti i pomoći od uprave koja postavlja "governance" strukturu. Kod uspostavljanja ciljeva u velikim građevinskim projektima sve više se pridaje pažnja ostvarenju principa održivosti (planeta, profita i socijalne zajednice, 3P) kao jednog od važnih ciljeva, a ti ciljevi vežu se uz očekivanja interesnih sudionika koji se uključuju u projekt kako bi doprinijeli ostvarenju tih ciljeva. Ovo područje još uvijek je u ranoj fazi istraživanja i problem je u tome što se često i dalje analiza interesnih sudionika najčešće zasnivana na procjeni voditelja projekta, odnosno tek se kod uključivanja interesnih sudionika uzimaju u obzir aspekti održivosti (3P).

5 Zaključak

U radu je prikazano sadašnje stanje UIS u velikim građevinskim projektima. Napravljen je pregled literature, koji je razrađen kroz dvije važne specifične teme, analiza i uključivanje interesnih sudionika, koje istodobno predstavljaju dva glavna procesa UIS. Analizom područja održivosti u građevinarstvu i "governance" projekata kao specifičnih tema vezanih uz upravljanje velikim građevinskim projektima prikazuju se specifičnosti UIS karakteristične za velike građevinske projekte. Kroz diskusiju navedeni su nedostaci u postojećim modelima u vidu nestandardiziranosti te je detektirana potreba za daljnjim razvojem sveobuhvatnoga sustava za UIS.

Cilj je budućih istraživanja razviti okvir za detektiranje karakteristika interesnih sudionika koji bi sistematizirao sve postojeće (istražene) karakteristike i time doprinio povećanju standardiziranosti ovoga područja. Također, jedan je od ciljeva strategije uključivanja interesnih sudionika (sustavno) povezati s analizom kako bi se omogućio odabir ispravne strategije na temelju objektivnih informacija dobivenih iz analize. Time se želi utjecati na to da se odabir strategije uključivanja interesnih sudionika unaprijedi i više ne provodi na temelju (subjektivne) procjene voditelja projekta. Konačni je cilj budućih istraživanja razraditi sveobuhvatne smjernice za UIS u velikim građevinskim projektima i smjestiti ih u okvir "governance" strukture projekta, uzimajući u obzir aspekte održivosti u građevinarstvu, a ti bi aspekti bili sagledavani u oba glavna (povezana) procesa UIS.

Razvojem ovakvih smjernica napraviti će se korak prema povećanju standardiziranosti područja upravljanja interesnim sudionicima velikih građevinskih projekata. Sagledavajući implikacije na teorijske koncepcije područja doprinijet će se specifičnim temama unutar područja UIS, analizi interesnih sudionika i uključivanju interesnih sudionika, a u praksi će pružiti novi sustavni pristup koji će jasno određivati na razini projekta na koji način pristupiti upravljanju interesnim sudionicima.

Literatura

- [1] Coesmans, P., Fuster, M., Garde Schreiner, J., Goncalves, M., Huynink, S., Jaques, T., Pugacevskis, V., Sedlmayer, M., Thyssen, D., Tovb, A., Vukomanović, M., Young M.: Individual Competence Baseline for Project Programme and Portfolio Management., 4. izdanje, Van Haren Publishing, 2015.
- [2] Car-Pušić, D., Radujković, M.: Modeli za procjenu održivog vremena građenja, GRAĐEVINAR, 58 (2006) 7, pp. 559-568.,
- [3] Annual Review of Project Performance Results. 1990., World Bank.
- [4] Burcar Dunovic, I., Colombo, R., Mancini, M., Littau, P.: A case study approach to megaproject stakeholder analysis through sustainability issues, in: Proceedings of IRNOP 2015.

-
- [5] Freeman, R.E.: *Strategic management: A stakeholder approach*, Pitman publishing, Boston MA, 1984.
- [6] Bal, M., Bryde, D., Fearon, D., Ochieng, E.: *Stakeholder Engagement: Achieving Sustainability in the Construction Sector*, *Sustainability*, 6 (2013), pp. 695-710.
- [7] Smith, J., Love, P.E.D., Wyatt, R.G.: *To build or not to build? Assessing the strategic needs of construction industry clients and their stakeholders*. *Structural Survey*, 19 (2001) 2, pp. 121–32.
- [8] Chinyio, E.A., Akintoye, A.: *Practical approaches for engaging stakeholders: findings from the UK*. *Construction Management and Economics*, 26 (2008) 6, pp. 591–9.
- [9] Yang, J., Shen, G.Q., Ho, M., Drew, D.S., Xue, X.: *Stakeholder management in construction: An empirical study to address research gaps in previous studies.*, *International Journal of Project. Management*, 29 (2011), pp. 900–910.
- [10] Mok, K.Y., Shen, G.Q., Yang, J.: *Stakeholder management studies in mega construction projects: A review and future directions.*, *International Journal of Project. Management*, 33 (2015), pp. 446–457.
- [11] Yang, J., Shen, Q., Ho, M.: *An overview of previous studies in stakeholder management and its implications for the construction industry*. *Journal of Facility. Management*, 7 (2009), pp. 159–175.
- [12] Rowlinson, S., Koh, T.Y., Tuuli, M.M.: *Stakeholder management in the Hong Kong construction industry*. *Construction stakeholder management*, E. Chinyio and P. Olomolaiye, eds., Wiley-Blackwell, Oxford, U.K., 2010.
- [13] Chinyio, E.A., Olomolaiye, P.: *Construction stakeholder management*, Wiley-Blackwell, Oxford, U.K., pp. 377- 380., 2010.
- [14] Lynch, R.: *2006 Corporate Strategy*, 4th edn, Pearson Education Limited, Harlow.
- [15] Flyvbjerg, B.: *Over budget, over time, over and over again: managing major projects in* Morris, P., Pinto, J. K. and Söderlund, J., eds., Oxford, UK: Oxford University Press, pp. 321-344., 2011.
- [16] Travaglini, A., Burcar Dunović, I., Mancini, M.: *Megaproject case studies: a stakeholder management perspective*, *Proceedings - International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur, 2016.
- [17] Muller, R.: *Project Governance. Fundamentals of Project Management.*, Surrey: Gower Publishing, 2009.
- [18] OECD, *OECD Principles of Corporate Governance 2004*. 2004. Monks,
- [19] Winch, G.M.: *The Governance of Project Coalitions, Towards a Research Agenda*, in *Commercial Management of Projects.*, Blackwell Publishing Ltd., pp. 324- 343., 2008

- [20] Victorian Government Department of Sustainability and Environment, *Effective Engagement: Building Relationships with Community and Other Stakeholders*, The Community Engagement Network, Resource and Regional Services Division, Melbourne., 2005
- [21] Mitchell, R.K., Agle, B.R., Wood, D.J.: *Toward a theory of stakeholder identification and salience: Defining the principle of who and what really counts*, *Acad. Manag. Rev.*, 22 (1997), pp. 853–886.
- [22] Elkington J.: *Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*: New Society Publishers., 1998.
- [23] Karlson, J.T.: *Project stakeholder management*, *Engineering Management Journal*, 14 (2002) 4, pp. 19–24.
- [24] Walker, D.H.T., Bourne, L.M., Shelley, A.: *Influence, stakeholder mapping and visualization*. *Construction Management and Economics*, 26 (2007), pp. 645–658.
- [25] Yang, J., Shen, G.Q., Bourne, L., Ho, C.M., Xue, X.: *A typology of operational approaches for stakeholder analysis and engagement*. *Construction Management and Economics*, 29 (2011), pp. 145-162.
- [26] Olander, S.: *External stakeholder analysis in construction project management*, *Construction Management and Economics*, 25 (2006), pp. 277-287.
- [27] Nguyen, N.H., Skitmore, M., Wong, J.K.W.: *Stakeholder impact analysis of infrastructure project management in developing countries: a study of perception of project managers in state-owned engineering firms in Vietnam*. *Construction Management Economics*, 27 (2009), pp. 1129–1140.
- [28] Winch, G. M.: *Managing Construction projects: an information processing approach*, 2nd Edition, Wiley-Blackwell, West Sussex, UK., 2010.
- [29] Murray-Webster, R., Simon, P.: *Make sense of stakeholder management with sensible stakeholder mapping*, *PM World Today - Connecting the World of Project Management*, 8 (2006) 11.
- [30] Yang, R.J., Shen, G.Q.P.: *Framework for Stakeholder Management in Construction Projects*., *Journal of Management in Engineering*, 31 (2015), pp. 1–14.
- [31] Clarkson, M.B.E.: *A risk based model of stakeholder theory*, in: *Proceedings of the Second Toronto Conference on Stakeholder Theory*., 1994.

Praćenje i kontrola produktivnosti građevinske mehanizacije integracijom bežičnih tehnologija

Martina Šopić¹, izv.prof.dr.sc. Mladen Vukomanović²

¹ Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, martina.sopic@uniri.hr

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

Sažetak

Procjena produktivnosti građevinske mehanizacije u kompleksnom i dinamičnom okruženju koje vlada na gradilištu težak je i zahtjevan zadatak. Točnom procjenom produktivnosti može se predvidjeti potrebno vrijeme i trošak građenja. Bežične tehnologije pružaju znatan potencijal za primjenu u mjerenju, planiranju, praćenju i kontroli produktivnosti građevinske mehanizacije. Posebno se ističe tehnologija RFID kao moguće rješenje problematike gradilišne produktivnosti. Poboljšanja u primjeni tehnologije RFID treba razmatrati integracijom s drugim bežičnim tehnologijama, posebice s GPS-om i GIS-om.

Gljučne riječi: produktivnost, građevinska mehanizacija, RFID, GPS, GIS

Tracking and control of the productivity of construction machinery by integrating wireless technologies

Abstract

Construction machinery productivity assessment in a complex and dynamic construction-site environment is a difficult and demanding task. The necessary time and cost of construction can be predicted through accurate assessment of productivity. Wireless technologies offer considerable potential in the sphere of measuring, planning, monitoring, and productivity control of construction machinery. RFID technology stands out as a possible solution to the construction site productivity problems. Improvements in the use of RFID technology should be considered through integration with other wireless technologies, GPS and GIS technologies in particular.

Key words: productivity, construction machinery, RFID, GPS, GIS

1 Uvod

Gradilište predstavlja jedinstveno, dinamično i kompleksno okruženje s kontinuirano prisutnom neizvjesnošću od mogućih pojava nepredvidljivih okolnosti i opasnosti koje, ako se ostvare, mogu imati nepovoljan utjecaj na izvođenje radova, što se u konačnici nepovoljno odražava i na cjelokupni uspjeh građevinskoga projekta. U takvim uvjetima nemoguće je unaprijed točno predvidjeti produktivnost građevinske mehanizacije na gradilištu, što izravno vodi netočnim procjenama potrebnoga vremena i troška građenja. Tradicionalne metode, koje podrazumijevaju procjenu produktivnosti na temelju specifikacija strojeva, informacija iz završenih, sličnih projekata te osobnoga iskustva, prema provedenim studijama na različitim gradilištima netočne su [1]. Mjerenje stvarne produktivnosti na gradilištu pri neposrednom izvođenju radova pruža mogući izlaz iz labirinta krivih, netočnih i subjektivnih procjena. Mjerenje stvarne produktivnosti potrebno je za donošenje ispravnih odluka i pravovremenih korektivnih mjera te omogućava točnije predviđanje trajanja aktivnosti, kao i potrebnih troškova i resursa.

Bežične tehnologije pružaju obećavajuću metodu za prikaz stvarnih uvjeta na gradilištu, točno praćenje kretanja i rada građevinske mehanizacije bez remećenja njihova normalnoga rada, veću produktivnost, brzu i točnu obradu velikih količina podataka s gradilišta, znatno umanjen utjecaj ljudskoga faktora i ljudske pogreške te, u konačnici, mogućnost za uspješno i kvalitetno izvršenje građevinskih projekata. Osnovne su karakteristike bežičnih tehnologija mobilnost, zatim povezivanje, prijenos i uporaba svih vrsta informacija bez uporabe fizičkih komunikacijskih kanala u obliku kabela te kontinuiran, brz razvoj s povećanjima mogućnosti u primjeni. Iako bežične tehnologije predstavljaju područje sa znatnim potencijalom u mjerenju, planiranju, praćenju i kontroli produktivnosti građevinske mehanizacije, njihova je primjena nedovoljno istražena. Također, dosadašnja istraživanja upućuju na nedostatke i ograničenja.

Pregledom literature u primjeni bežičnih tehnologija autori Kim i dr. [2] ističu visoku učinkovitost tehnologije *Radio Frequency Identification* (RFID) sa širokom primjenom u različitim područjima te navode da ona može znatno doprinijeti praćenju i kontroli izvedbe radova na gradilištu. Također, autori Lu i dr. [3] ističu veliki potencijal tehnologije RFID i njezinu premalu primjenu u građevinarstvu. Osim toga, autori Lu i dr. [3], zatim Teizer i dr. (2010) te Karthik i dr. (2014) skreću pozornost na mogućnost primjene tehnologije RFID za praćenje položaja građevinske mehanizacije radi postizanja dobrog radnog rasporeda, sprječavanja sudara između vozila te radi zaštite života ljudi na gradilištu. Autori Andoh i dr. [4] predlažu integraciju tehnologije RFID s tehnologijama *Global Positioning System* (GPS) i *Geographic Information System* (GIS) radi kontinuiranoga praćenja gradilišne dinamike.

Na temelju pregleda literature i naglašenih značajki te primjena na gradilištu, tehnologija RFID posebno se ističe kao moguće rješenje za razvoj odgovarajuće, pouzdane, vjerodostojne, brze i ekonomične metodologije koja će mjeriti stvarnu produktivnost

građevinske mehanizacije. Razvojem vrsne metodologije omogućilo bi se točno vremensko i novčano planiranje projekta, potom identifikacija slabe produktivnosti te brzo interveniranje i pravovremeno poduzimanje odgovarajućih korektivnih mjera, kao i prilagodba projektnoga plana, a osim toga, metodologija bi služila za povećanje produktivnosti te kao kvantitativan pokazatelj dobro poduzetih korektivnih mjera, napretka izvedbe i dinamike realizacije. Razvoj spomenute metodologije olakšao bi upravljanje građevinskim projektima, a investitori bi stalno bili upoznati s trenutačnim stanjem i planom projekta.

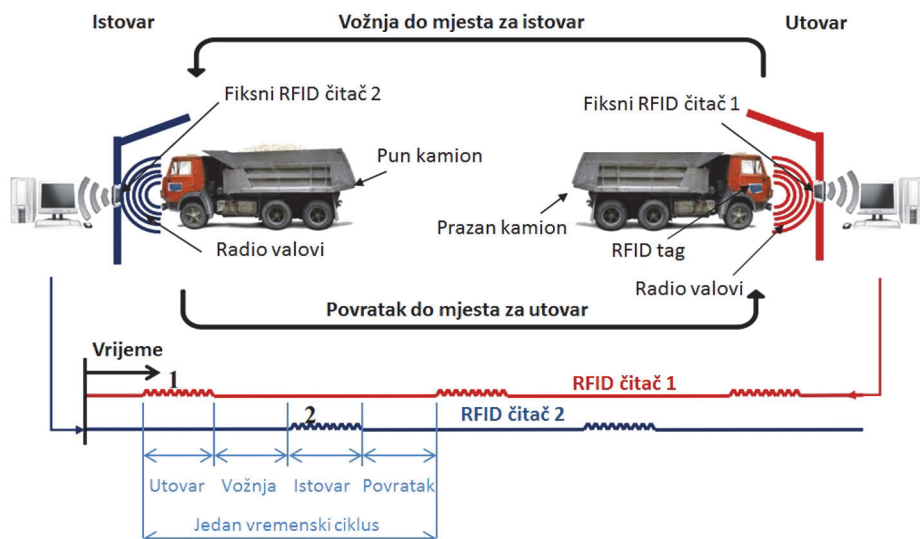
U radu su prikazani primjeri procjene stvarne produktivnosti primjenom tehnologije RFID navedeni u literaturi, koji bi mogli poslužiti kao temelj za razvoj željene metodologije. Također, u radu je naveden primjer procjene stvarne produktivnosti primjenom GPS-a i GIS-a, koji bi mogao poslužiti kao prijedlog za integraciju s tehnologijom RFID. Zbog nedostataka i ograničenja svake pojedine bežične tehnologije, integracija bežičnih tehnologija omogućila bi da se nemogućnost rješavanja određenoga problema primjenom jedne bežične tehnologije uspješno izvrši primjenom drugih bežičnih tehnologija.

2 Bežične tehnologije

2.1 *Radio Frequency Identification (RFID) technology*

Radio Frequency Identification (RFID) technology primjer je bežične tehnologije koja putem radio valova ostvaruje komunikaciju između uređaja. Osnovni sastavni dijelovi tehnologije RFID su RFID tag, RFID čitač i računalo. RFID tag se sastoji od silikonskoga mikročipa i antene. Osim u obliku predmeta, najmanjih dimenzija veličine zrna riže, RFID tag može biti i u obliku naljepnice. RFID tagovi prema izvoru napajanja, ugrubo, mogu biti pasivni ili aktivni. Pasivni RFID tag nema svoje vlastito napajanje, nego energiju za rad prima podražajem RFID čitača. Komunikacija pasivnog RFID taga s RFID čitačem može se odvijati unutar nekoliko metara. Ako se pasivni RFID tag nalazi izvan svog mogućeg dosega za povezivanje s RFID čitačem, nema napajanje te nije u mogućnosti odašiljati i primati radio valove. Aktivni RFID tag ima svoje vlastito napajanje, najčešće baterijom, a komunikacija s RFID čitačem može se odvijati unutar udaljenosti od nekoliko stotina metara. Aktivni RFID tag, u odnosu na pasivni RFID tag, ima i višestruko veći kapacitet memorije, bolju iskoristivost u okruženju ometajućih faktora poput elektromagnetske buke, metala, vlažnosti, no zbog boljih radnih karakteristika ima veću cijenu koštanja. Pasivni RFID tagovi laganiji su i manjih dimenzija od aktivnih RFID tagova, a budući da nemaju bateriju, vijek trajanja im je dulji. RFID čitači predstavljaju vezu između RFID tagova i računala. Osim za napajanje pasivnih RFID tagova, služe za primanje, čitanje i obradu podataka s RFID tagova te prijenos tih podataka na računalo. Također, mogu služiti za zapis podataka na RFID tag. Računalo umrežuje RFID čitače sustava te prikuplja, skladišti i obrađuje podatke.

Pregledom literature u primjeni tehnologije RFID u mjerenju, planiranju, praćenju i kontroli produktivnosti građevinske mehanizacije, posebno se ističu autori Montser i Moselhi [7, 8] koji su predložili metodologije za mjerenje stvarne produktivnosti iprilikom izvođenja radova na gradilištu. Svoja istraživanja su proveli mjereći duljinu trajanja vremenskog ciklusa kamiona kiperera i skrejpera. Izračunom duljine trajanja vremenskoga ciklusa može se deterministički ili provođenjem simulacija u računalnim programima dobiti procjena stvarne produktivnosti praćene građevinske mehanizacije [7]. Svrha je metodologija koje su predložili rano otkrivanje odstupanja između planiranog i stvarnog izvođenja radova, kako bi se na vrijeme mogle poduzeti odgovarajuće korektivne mjere [7, 8].

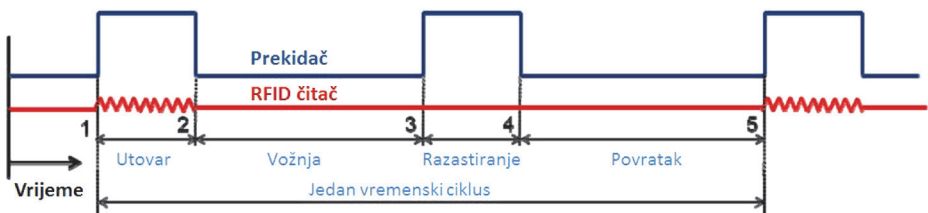


Slika 1. Pregled primijenjene tehnologije RFID (preuzeto, uređeno i prevedeno: Montaser i Moselhi, 2012)

Kamion kiperer je transportno sredstvo s ojačanim kamionskim podvozjem na kojem se nalazi specijalno dizajniran sanduk s karakterističnom sposobnošću samoistovara. Kamioni kipereri su takvih konstrukcija i mjera da se, osim na gradilištu, mogu rabiti i u javnom cestovnom prometu. Vremenski ciklus kamiona kiperera sastoji se od vremena potrebnoga za punjenje praznog sanduka kamiona kiperera, zatim vremena vožnje punog kamiona kiperera do mjesta za istovar, vremena pražnjenja punoga sanduka kamiona kiperera te vremena potrebnoga za povratak praznog kamiona kiperera na mjesto za utovar. Prema metodologiji autora Montasera i Moselhija [7] trajanje vremenskoga ciklusa kamiona kiperera mjerilo se tako da je jedan RFID čitač bio postavljen na mjestu za utovar, dok je drugi RFID čitač bio postavljen na mjestu za istovar. RFID čitači su komunicirali s pasivnim RFID tagom, postavljenim na kamion kiperer. Maksimalan domet primanja i odašiljanja radio

valova pasivnoga RFID taga upotrijebljenog u istraživanju, unutar kojega je mogao komunicirati s RFID čitačem, bio je radijus od tri metra. U vremenu vožnje punog kamiona kiperu do mjesta istovara te u vremenu povratka praznog kamiona kiperu do mjesta za utovar, pasivni RFID tagovi nisu bili u mogućnosti komunicirati s RFID čitačima. Vremenskom zabilježbom aktivnosti kamiona kiperu, tehnologijom RFID, dobio se njegov vremenski ciklus.

Skrejper je standardni građevinski stroj za masovni iskop pretežno zemljanih materijala, prijevoz iskopanoga materijala te njegovu ugradnju razastiranjem. Vremenski ciklus skrejpera sastoji se od vremena iskopa i istovremenoga prihvaćanja iskopanoga materijala u sanduk skrejpera, zatim vremena vožnje punog sanduka skrejpera, vremena potrebnoga za razastiranje iskopanoga materijala te vremena povratka skrejpera na mjesto iskopa. Pri iskopu i istovremenom prihvaćanju iskopanoga materijala u sanduk skrejpera potrebna je najveća snaga za pogon. Pušdozer je građevinski stroj za guranje drugih strojeva, te se može upotrijebiti kao potpora skrejperu pri iskopu. Kombinacijom skrejper-pušdozer pri iskopu smanjuje se opterećenje na gume skrejpera, ubrzava se vrijeme iskopa te se, samim time, povećava produktivnost pri izvođenju radova. Prema metodologiji autora Montsera i Moselhija [8], trajanje vremenskoga ciklusa skrejpera, kojega je prilikom iskopa gurao pušdozer, mjerio se tako da je pasivni RFID tag bio postavljen na stražnjoj strani skrejpera, dok je na prednjoj strani pušdozera bio postavljen RFID čitač. Domet prijenosa radio valova pasivnoga RFID taga bio je par centimetara i mogao je komunicirati s RFID čitačem samo pri iskopu, kada je pušdozer gurao skrejper. Nadalje, na sanduk skrejpera postavio se prekidač, spojen kabelom za mikrokontroler. Prekidač je tip senzora koji se mehanički aktivira, a njegova uloga bila je zabilježba vremena kada je sanduk skrejpera otvoren, odnosno zatvoren. Prekidač podatke o stanju sanduka skrejpera, kabelom šalje mikrokontroleru, koji bežično komunicira s RFID čitačem. Vremenskom zabilježbom aktivnosti pušdozera i stanja sanduka skrejpera, tehnologijom RFID, dobio se vremenski ciklus skrejpera.



Slika 2. Skica interakcije podataka RFID čitača i prekidača (preuzeto, uređeno i prevedeno: Montaser i Moselhi, 2013)

Autori Montaser i Moselhi [7, 8] posebno su naglasili praktičnost i jednostavnost svojih predloženih metodologija za procjenu stvarne produktivnosti pri izvođenju

radova, upotrebom tehnologije RFID. Poboljšanje svoje metodologije vide u senzoru težine za potvrdu je li sanduk dovoljno ili previše napunjen [8]. Sanduk treba biti napunjen do svog kapaciteta. Preopterećeni sanduk uzrokuje veću potrošnju goriva, preopterećenje guma i povećava mogućnost mehaničkoga kvara, dok nedovoljno napunjen sanduk rezultira niskom produktivnošću. Nadalje, poboljšanje metodologije vide i u digitalnoj kameri koja bi snimala otvaranje i zatvaranje sanduka skrejpera [8]. Svrha je digitalne kamere sprječavanje krivoga tumačenja podataka u slučaju da se sanduk skrejpera otvori, a da nije vrijeme iskopa ili razastiranja materijala. Također, predlažu i integriranje tehnologije RFIDs GPS-om i GIS-om [8]. Integracijom tehnologije RFIDs GSP-om i GIS-om dobila bi se mogućnost za prikaz i praćenje vožnji strojeva u stvarnom prostoru i vremenu.

Autorilbrahim i Moselhi [9] zamjerku metodologije Montasera i Moselhija [7] pronalaze u tome da se tehnologijom RFID ne može dobiti informacija je li sanduk kamiona kiperu dovoljno napunjen. Također, ističu da je njezina primjena nepraktična za izvedbu dugačkih linijskih građevina i prometnica. Nadalje, autori Alshibani i Moselhi [10] istaknuli su da, iako je RFID tehnologija uz upotrebu pasivnih RFID tagova niske cijene koštanja, njezin je najveći nedostatak nemogućnost dobivanja informacija o radu kamiona kiperu u vremenu vožnje punoga kamiona kiperu do mjesta za istovar te u vremenu povratka praznog kamiona kiperu do mjesta za utovar.

2.2 *Global Positioning System (GPS) i Geographic Information System (GIS)*

Global Positioning System (GPS) moćan je satelitski radionavigacijski sustav za određivanje trenutačnoga položaja objekata te pojedinaca. GPS se sastoji od skupine umjetnih satelita (satelitski segment GPS-a), zemaljskih kontrolnih postaja (kontrolni segment GPS-a) te GPS prijarnika (korisnički segment GPS-a). Zemaljske kontrolne postaje neprekidno prate gibanje i rad satelita. Umjetni sateliti kontinuirano odašilju radiosignale o svom trenutačnom položaju i vremenu odašiljanja radiosignala. GPS prijarnik, analizirajući radiosignale koje je primio sa satelita, proračunava svoj trenutačni položaj. Na putu radiosignala do GPS prijarnika ne smiju biti fizičke prepreke. Točnost mjerenja položaja GPS tehnologijom uglavnom je unutar pet metara, ali uvelike ovisi o okruženju unutar kojeg se nalazi GPS prijarnik te o specifikacijama i mogućnostima samog GPS prijarnika. Visoke građevine, konfiguracija terena te stabala mogu ometati primanje satelitskih radiosignala, zatim vremenske neprilike, satelitska održavanja, kao i mape koje mogu imati nedostajući ili zabranjen ili netočno procijenjen sadržaj te tako dodatno smanjiti točnost pozicioniranja GPS tehnologijom. Minijaturizacijom GPS prijarnika, zatim povezivanjem GPS-a s telekomunikacijskim sustavimatehnologije *Global System for Mobile communications (GSM)* te *sGeographic Information System (GIS-om)*, dobio je široku i nezaobilaznu primjenu.

Geographic Information System (GIS) je informacijsko računalni sustav za prikupljanje, pohranu, obradu i analizu prostornih podataka stvarnoga svijeta. Prostorni podaci, najčešće u pojedinim tematskim slojevima, prikazuju prirodne ili društvene sadržaje Zemljine površine u dvodimenzionalnom ili trodimenzionalnom obliku. GIS omogućuje složene prostorne analize te prikaz prostornih podataka izraženih kroz promjene u vremenu i prostoru.

Autori Alshibani i Moselhi [10] predstavili su metodologiju za praćenje i procjenu stvarne produktivnosti transportnih sredstava upotrebom GPS-a i GIS-a. Svrha metodologije, koju su predložili autori Alshibani i Moselhi [10], jednostavna je i praktična procjena stvarne produktivnosti na gradilištu te predviđanje potrebnoga vremena i troška izvođenja radova, koji su pod utjecajem transportnih sredstava. Prema njihovoj metodologiji, GPS prijamnik se postavlja na transportno sredstvo te se prati njegov radna GIS mapi. Dovoljno je postaviti jedan GPS prijamnik na jedno transportno sredstvo, koji radi i vozi istom rutom kao i ostatak transportnih sredstava koji sudjeluju u izvršavanju promatranih aktivnosti. U GIS mapi se, na temelju prikupljenih podataka s gradilišta i grafičke prezentacije ruta transportnih sredstava, definira područje utovara i istovara. Analizom prikupljenih GPS podataka, te dobivenim vremenima trajanja utovara, vožnje do mjesta za istovar, istovara i povratka do mjesta za utovar definira se trajanje vremenskoga ciklusa transportnog sredstva. Ovisno o odabranom broju praćenih ruta transportnih sredstava, dobiveni podaci se ubacuju u računalni softver Cristal Ball. Provođenjem simulacija u računalnom softveru Cristall Ball dobiva se stohastička procjena stvarne produktivnosti te procjena potrebnoga vremena i troška izvođenja radova, koji su pod utjecajem transportnih sredstava. Analizom dobivenih procjena provode se potrebne korektivne mjere. Procijenjena stvarna produktivnost praćenoga transportnog sredstva predstavlja i produktivnost ostalih transportnih sredstava uz pretpostavku da su svi strojevi u dobrom radnom stanju te da se nijednom od uključenih transportnih sredstava neće dogoditi kvar prilikom rada.

Autori Alshibani i Moselhi [10] istaknuli su da je metodologija primjenom tehnologija GPS i GIS trenutačno istražena i ograničena na radove koji uključuju upotrebu transportnih sredstava. Također, naveli su da je metodologija primjenjiva samo za otvoreno područje rada kako ne bi došlo do ometanja u primanju satelitskih radiosignala. Istraživanje autora Alshibanija i Moselhija [10] nedavno je objavljeno te trenutačno nema osvrt na njihov rad.

Tablica 1. Usporedni prikaz značajki tehnologija RFID i GPS

RFID		GPS
KARAKTERISTIKE		
Aktivni RFID tag	Pasivni RFID tag	GPS prijamnik
Vlastito napajanje (najčešće baterijom).	Nemaju svoje vlastito napajanje, nego energiju za rad primaju podražajem RFID čitača.	Punjiva baterija. Točnost mjerenja položaja GPS tehnologijom uglavnom je unutar pet metara, ali uvelike ovisi o okruženju unutar kojega se nalazi GPS prijamnik te o specifikacijama i mogućnostima samog GPS prijamnika.
Komunikacija s RFID čitačem unutar udaljenosti od nekoliko stotina metara.	Komunikacija s RFID čitačem unutar udaljenosti od nekoliko metara.	Visoke građevine, konfiguracija terena te stabala mogu ometati primanje satelitskih radiosignala, zatim vremenske neprilike, satelitska održavanja, kao i mape koje mogu imati nedostajući ili zabranjen ili netočno procijenjen sadržaj te tako dodatno smanjiti točnost pozicioniranja GPS tehnologijom.
U odnosu na pasivne RFID tagove, imaju višestruko veći kapacitet memorije, bolju iskoristivost u okruženju ometajućih faktora (elektromagnetska buka, metal, vlažnost), no zbog boljih radnih karakteristika imaju veću cijenu koštanja.	U odnosu na aktivne RFID tagove, laganiji su i manjih dimenzija, a budući da nemaju bateriju za rad, vijek trajanja im je dulji te imaju nižu cijenu koštanja.	
PRIMJERI MOGUĆNOSTI ZA PRAĆENJE I KONTROLU PRODUKTIVNOSTI GRAĐEVINSKE MEHANIZACIJE		
Sprječavanje sudara između vozila, postizanje dobrog radnog rasporeda strojeva na gradilištu. Istraženo mjerenje stvarne produktivnosti kamiona kiperi i skrejpera prilikom izvođenja radova na gradilištu. Znatno potencijal za prikaz stvarnih uvjeta na gradilištu.	Prikaz i praćenje vožnji strojeva u stvarnom prostoru i vremenu. Istraženo mjerenje stvarne produktivnosti transportnih sredstava pri izvođenju radova na gradilištu povezivanjem s GIS-om. Znatno potencijal za prikaz stvarnih uvjeta na gradilištu.	
EFIKASNOST PRIMJENE NA GRADILIŠTU OVISNO O VRSTI GRAĐEVINSKIH OBJEKATA		
Zgrade	Prometnice	
NEDOSTACI		
Nedovoljno istražena. Nemogućnost dobivanja informacija o radu strojeva izvan dosega moguće komunikacije s RFID čitačem. Nepraktična primjena za izvedbu dugačkih linijskih građevina i prometnica. Nedostajući podaci mehaničkog stanja stroja poput napunjenosti sanduka, izmjera temperature, tlaka, nadgledanje pneumatika ciljem osiguranja niske potrošnje goriva i dr. (razni senzori ili senzori u sklopu mjernih sustava za praćenje i nadzor strojeva tvrtki <i>Caterpillar, Trimble, Leica, Bomag</i> i dr.). Nepostojanje automatskoga i daljinskog navođenja strojeva (poput mjernih sustava za praćenje i nadzor strojeva tvrtki <i>Caterpillar, Trimble, Leica, Bomag</i> i dr.).	Nedovoljno istražena. Primjenjiva samo za otvoreno područje rada kako ne bi došlo do ometanja u primanju satelitskih radiosignala. Nedostajući podaci mehaničkog stanja stroja poput napunjenosti sanduka, izmjera temperature, tlaka, nadgledanje pneumatika s ciljem osiguranja niske potrošnje goriva i dr. (razni senzori ili senzori u sklopu mjernih sustava za praćenje i nadzor strojeva tvrtki <i>Caterpillar, Trimble, Leica, Bomag</i> i dr.). Nepostojanje automatskoga i daljinskog navođenja strojeva (poput mjernih sustava za praćenje i nadzor strojeva tvrtki <i>Caterpillar, Trimble, Leica, Bomag</i> i dr.).	

3 Zaključak

Procjena produktivnosti građevinske mehanizacije u kompleksnom i dinamičnom okruženju koje vlada na gradilištu težak je i zahtjevan zadatak. Točnom procjenom produktivnosti može se predvidjeti potrebno vrijeme i trošak građenja. Trenutačne procjene produktivnosti nemaju odgovarajuću, pouzdanu, vjerodostojnu, brzu i ekonomičnu metodologiju. Bežične tehnologije pružaju znatan potencijal za primjenu u mjerenju, planiranju, praćenju i kontroli produktivnosti građevinske mehanizacije. Njihova je primjena nedovoljno istražena. Također, do sada provedena istraživanja upućuju na nedostatke i ograničenja. Unatoč tome, posebno se ističe tehnologija RFID kao moguće rješenje problematike gradilišne produktivnosti. Poboljšanja u primjeni tehnologije RFID treba razmatrati integracijom s drugim bežičnim tehnologijama, posebno s GPS-om i GIS-om. U tablici 1. usporedno su prikazane značajke tehnologija RFID i GPS, spomenute u ovom radu.

Prijedlog istraživanja je definiranjem ključnih spoznaja u tehnologiji RFID i mogućnostima u primjeni i procjeni stvarne produktivnosti, prilikom neposrednog izvođenja radova, razvoj osnovnog modela. Radi poboljšanja osnovnoga modela treba istražiti integraciju tehnologije RFID s drugim bežičnim tehnologijama, posebno s GPS-om i GIS-om, a bilo bi vrlo značajno uklopiti i brzorastuću tehnologiju GSM. Osim toga, bilo bi neophodno analizirati već postojeća rješenja automatskoga i daljinskog navođenja strojeva, mjernih sustava tvrtki *Caterpillar*, *Trimble*, *Leica*, *Bomag* i dr. Tako razvijenim modelom pratila bi se standardna građevinska mehanizacija s cikličnim načinom rada te bi se mjerio njihov vremenski ciklus. Računalnom obradom dobivenih podataka dobila bi se procjena stvarne produktivnosti. Nadalje, treba istražiti i mogućnosti prilagodbe razvijenoga modela za mjerenje stvarne produktivnosti posebne građevinske mehanizacije. Istraživanjem razvijenoga modela na primjerima različitih projekata stvorila bi se mogućnost za razvoj odgovarajuće, pouzdane, vjerodostojne, brze i ekonomične metodologije za podršku pri mjerenju, planiranju, praćenju i kontrole produktivnosti građevinske mehanizacije. Sljedeći bi korak bio, ovisno o dobivenim rezultatima gradilišne produktivnosti, usmjeren prema identifikaciji slabe produktivnosti, kao i mogućnostima za poboljšanje produktivnosti građevinske mehanizacije. Razvoj vrsne metodologije uvelike bi doprinio donošenju ispravnih odluka za rješavanje građevinske problematike i omogućio siguran put za uspješnu realizaciju građevinskih projekata.

Literatura

- [1] Rashidi, A., Rashidi Nejad, H., Maghiar, M.: Productivity Estimation of Bulldozers using Generalized Linear Mixed Models, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (2014) 6, pp. 1580-1589.

- [2] Kim, S., Kim, S., Tang, L.C.M., Kim, G. H.: Efficient Management of Construction Process Using RFID+PMIS System: A Case Study, *Applied Mathematics & Information Sciences*, 7 (2013) 1, pp. 19-26.
- [3] Lu, W., Huang, G. Q., Li, H.: Scenarios for applying RFID technology in construction project management, *Automation in Construction*, 20 (2011) 2, pp. 101-106.
- [4] Teizer, J., Allread, B.S., Fullerton, C.E., Hinze, J.: Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system, *Automation in Construction*, 19 (2010) 5, pp. 630-640.
- [5] Karthik, G., Jayanthu, S., Rammohan, P., Rahman, A.: Utilisation of mobile communication in opencast mines, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 3 (2014) 7, pp. 373-378.
- [6] Andoh, A.R., Su, X., Cai, H.: A Framework of RFID and GPS for Tracking Construction Site Dynamics, *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*, West Lafayette, Indiana, pp. 818-827, 2012.
- [7] Montaser, A., Moselhi, O.: RFID+ for Tracking Earthmoving Operations, *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*, West Lafayette, Indiana, pp. 1011-1020, 2012.
- [8] Montaser, A., Moselhi, O.: Tracking Scraper-Pusher Fleet Operations Using Wireless Technologies, *4th Construction Specialty Conference*, Montreal, Quebec, 2013.
- [9] Ibrahim, M., Moselhi, O.: Automated productivity assessment of earthmoving operations, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 19 (2014) 9, pp. 169-184.
- [10] Alshibani, A., Moselhi, O.: Productivity based method for forecasting cost & time of earthmoving operations using sampling GPS data, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 21 (2016) 3, pp. 39-56.

Sprječavanje štetnih posljedica lutajućih struja na kolosiječne konstrukcije

Katarina Vranešić¹, prof.dr.sc. Stjepan Lakušić²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb, kvranesic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb, laki@grad.hr

Sažetak

Korozija zbog lutajućih struja prisutna je na svim kolosijecima gdje tračnice i pričvrtni pribor nisu dovoljno izolirani od okoline te dolazi do istjecanja struje iz tračnice. Danas postoje različite metode smanjivanja lutajućih struja i daljnje monitoringa. Posebice su djelovanje lutajućih struja izloženi kolosijeci u urbanim sredinama. U ovom je radu obrađena problematika lutajućih struja na tramvajskoj mreži u Zagrebu, gdje lutajuće struje predstavljaju veliki problem, a korozija izaziva sve veće degradacije tračnica i pričvrtnoga pribora. Unatoč velikom problemu u zadnjih 10 godina, Upravitelj tramvajske infrastrukture nije još izradio detaljnju analizu degradacije kolosijeka te određivanja najugroženijih dijelova (zona). Ovakva analiza svakako treba rezultirati akcijskim planom za smanjivanje istjecanja struje iz tračnica, odnosno uporabom sustava pričvršćenja koji će osigurati veću otpornost na djelovanje lutajućih struja

Gljučne riječi: kolosijek, lutajuće struje, korozija, monitoring, održavanje kolosijeka

Preventing damaging consequences of stray currents on track structure

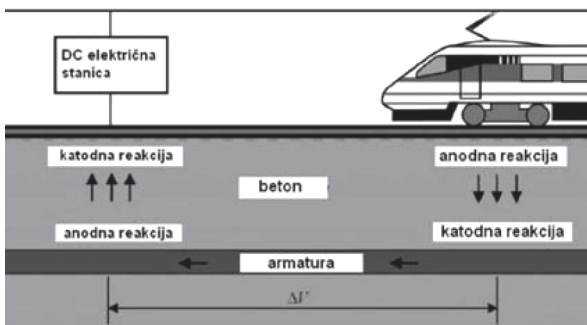
Abstract

The stray current corrosion is present at all tracks where rails and fastening accessories are not sufficiently insulated, and so the current flows out of the rails. There are currently many methods for reducing stray currents and further monitoring. Tracks in urban areas are particularly susceptible to stray currents. This paper deals with stray current problems on tram tracks in Zagreb, where stray current corrosion is causing increasing damage to rails and fastening accessories. Despite the magnitude of the problem experienced over the past ten years, the tram infrastructure manager has still not conducted a detailed track degradation analysis to determine the most endangered parts (zones). This analysis would surely result in action plan for reducing current leakage from rails by making use of an appropriate rail fastening system that will ensure much greater resistance to stray current activity.

Key words: track, stray current, corrosion, monitoring, track maintenance

1 Uvod

U većini urbanih kolosijeka tračnice se upotrebljavaju kao povratni put struje do elektrovočne podstanice. Na mjestima oslabljene izolacije struja izlazi iz tračnice jer pronalazi put manjega otpora te ulazi u ukopane metalne konstrukcije položene neposredno uz tramvajsku infrastrukturu i postaje lutajuća struja [1]. U blizini podstanice struja napušta podzemnu konstrukciju i kroz tlo se vraća natrag u podstanicu. Na mjestima izlaska struje iz tračnice, kao i na mjestima izlaska iz ukopanih metalnih konstrukcija nastaje korozija (slika 1.) [2]. Intenzitet struje koja istječe iz tračnice ovisi o električnoj provodljivosti tračnice te o kvaliteti izolacijskoga materijala između tračnice i medija u kojemu se tračnica nalazi. Na intenzitet lutajuće struje također utječu i akceleracija tramvaja i deceleracija (usporevanje tramvaja zbog kočenja), atmosferski uvjeti te održavanje kolosijeka [3]. Da bi se djelovanje lutajućih struja smanjilo, provode se mjere sprječavanja istjecanja struja na izvoru te mjere zaštite ukopanih metalnih konstrukcija u blizini kolosijeka [3]. Razvijene su različite metode sprječavanja istjecanja struje iz tračnica, kao npr. smanjivanje otpora tečenju struje uporabom tračnica veće mase, bolja izolacija tračnice i pričvrsnoga pribora, smanjivanje razmaka između elektrovočnih podstanica [3]. Na ukopanim cjevovodima najučinkovitiju metodu zaštite konstrukcije predstavlja katodna zaštita, međutim ovaj način zaštite zahtijeva stalan nadzor i upravljanje te ne sprječava pojavu lutajućih struja [4]. Svakako je najučinkovitiji način zaštite sprječavanje lutajućih struja na izvoru.



Slika 1. Prikaz istjecanja lutajućih struja iz tračnice [2]

Djelovanje lutajućih struja smanjuje se povećavanjem udaljenosti od mjesta izvora struje. Smatra se da taj utjecaj postaje zanemariv na udaljenosti od 30 do 60 metara [5]. Problem lutajućih struja interdisciplinarno je područje i predstavlja opasnost svim metalnim konstrukcijama u blizini kolosijeka, kao i samomu kolosijeku. Danas postoje mnoge smjernice i priručnici za projektiranje tračničkih infrastruktura koje upozoravaju da je korozija uzrokovana lutajućim strujama prepoznat problem (u literaturi navedene smjernice i priručnici [6-9]). Međutim, na tramvajskoj mreži

u gradu Zagrebu ne provode se nikakve metode sprječavanja istjecanja struje te monitoringa potencijalno opasnih mjesta, što predstavlja velike probleme cijeloj infrastrukturi i rezultira ubrzanom degradacijom kolosijeka i metalnih konstrukcija položenih u blizini tramvajske infrastrukture.

2 Korozija uzrokovana lutajućim strujama

Korozija je degradacija metala zbog kemijske ili elektrokemijske reakcije metala s okolišem [10]. Korozija zbog lutajućih struja događa se na mjestima gdje struja izlazi iz metala i ulazi u elektrolit [1]. Na mjestu izlaska struje događa se anodna reakcija (oksidacija), odnosno dolazi do oslobađanja elektrona prema izrazu (1) [1]:



Tijekom anodne reakcije ioni željeza se oslobađaju u elektrolit i spajaju s hidroksilnim skupinama prilikom čega nastaje željezov (II) hidroksid $Fe(OH)_2$. Daljnjom reakcijom nastaje željezov (III) hidroksid $Fe_2(OH)_3$, odnosno hrđa [11]. Može se zaključiti da se anodna reakcija, nakon nekog vremena, manifestira korozijom metala [3]. Količina korodiranoga metala može se odrediti primjenom Faradayeva zakona. U korozijskoj ćeliji odnos između količine metala koji reagira te konstantne jakosti struje u određenom periodu vremena može se odrediti izrazom (2) [12]:

$$m = k \cdot I \cdot t \quad (2)$$

pri čemu su:

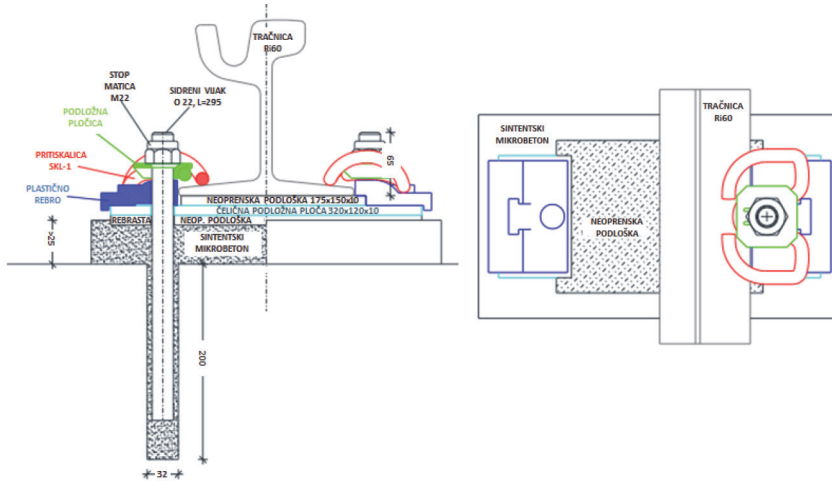
- m – masa korodiranog metala [kg]
- k – elektrokemijski ekvivalent [kg/A*godina]
- I – jakost struje [A]
- t – vrijeme [god].

Elektrokemijski ekvivalent za željezo iznosi 9,1 kg/A*godini, što znači da će unutar jedne godine struja jakosti 1A izazvati gubitak metala od 9,1 kg [13].

2.1 Primjeri korozije na tramvajskoj infrastrukturi u gradu Zagrebu

Tramvajski su kolosijeci u gradu Zagrebu izvedeni na armiranobetonskoj podlozi, a pričvršćenje tračnica ostvaruje se pomoću elastičnoga pričvrsnog pribora (sustav ZG-3/2), pričvrsnoga pribora povećane elastičnosti (sustav PPE) te dvostruko elastičnoga pričvrsnog pribora (sustav DEPP) [14]. Ove sustave karakterizira pričvršćenje tračnice pomoću elastičnih pritiskalica, i to: SKL-2 (kod sustava ZG-3/2) te SKL-1 (kod

sustava PPE i DEPP). Pozicioniranje kolosijeka po smjeru i visini ostvaruje se pomoću sidrenih vijaka. Na slici 2. [14] prikazan je poprečni presjek sustava PPE, gdje se može vidjeti da između čelične ploče i sidrenoga vijka nema izolacije, što uzrokuje značajno istjecanje lutajućih struja [15].



Slika 2. Presjek i tlocrt PPE sustava pričvršćenja [14]

Vozni je park Zagrebačkog električnog tramvaja (ZET-a) nakon 2005. godine obnavljan nabavkom 140 novih niskopodnih tramvaja TMK 2200 te 30 TMK 2300 tramvaja (kraća varijanta tramvaja TMK 2200) [12]. Tek su nekoliko godina nakon upotrebe prvih novih tramvaja uočene netipične degradacije kolosijeka kakve do tada nisu bile primjećivane na tračničkoj infrastrukturi (slika 3.) [15].



Slika 3. Stanje kolosijeka prije demontaže, Ilica, 2012. godina [15]

Oko 10 godina nakon puštanja u promet prvih tramvaja TMK 2200, bez održavanja pričvrsnoga pribora u međuvremenu, kolosijek je na nekoliko lokacija otvoren i uočen je gubitak materijala na čeličnoj podložnoj ploči ležajnoga mjesta te gubitak materijala nožice tračnice na pričvrstnomu mjestu, slika 4. Površina mjesta na kojoj je zabilježen gubitak materijala odgovara dimenziji ležajnoga mjesta [15].



Slika 4. Uobičajena degradacija tračnica uzrokovana gubitkom materijala na poziciji pričvrsnoga mjesta [17]

2.1.1 Mjerenje lutajućih struja u gradu Zagrebu

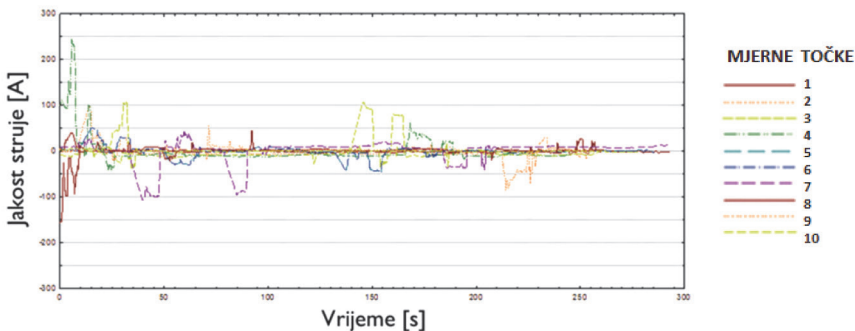
Preliminarno istraživanje utjecaja lutajućih struja na komunalnu infrastrukturu u gradu Zagrebu, u okviru diplomskoga rada, proveli su M. Serdar i suradnici s Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Vodeći se spoznajom da struja izlazi iz tračnica jer pronalazi put manjega otpora, te ulazi u obližnje metalne konstrukcije, izvršeno je mjerenje pomoću uređaja Stray Current Mapper (SCM) na ukopanim cjevovodima u blizini kolosijeka [18]. SCM se postavlja na površini, iznad cjevovoda (slika 5.) i pomiče cijelom duljinom cjevovoda te se na temelju izmjerenih podataka veličine struje i polariteta određuje postojanje lutajućih struja, gdje je struja ušla, odnosno gdje je izašla iz cijevi. Uređaj je spojen na računalo na kojemu se pohranjuju snimljeni podaci [19].



Slika 5. Mjerenje SCM uređajem [18]

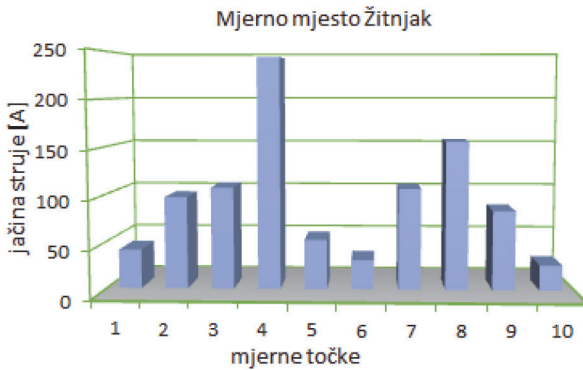
Za precizno mjerenje dinamičkih lutajućih struja (lutajućih struja nastalih istjecanjem iz tračnica) potrebne su minimalno dvije SCM senzoričke šipke. Jednu treba postaviti na površini tla, iznad cijevi, na mjestu za koje se pretpostavlja da je mjesto ulaska struje u metalni cjevovod, te se rabi kao referentna šipka, a druga se šipka pomiče uzduž cjevovoda. Na taj se način može odrediti smjer i magnituda struje [20].

Ovo je mjerenje provedeno pomoću jedne SCM senzoričke šipke, zbog čega nije bilo moguće provesti detaljniju analizu dinamičkih lutajućih struja, već je jedino bilo moguće na mjernom mjestu zabilježiti da prolaskom tramvaja dolazi do znatnoga povećanja struje u cjevovodu. Mjerenje je provedeno na nekoliko mjernih točaka na tri lokacije u gradu Zagrebu (Ilica, Kvaternikov trg, Žitnjak) i na svim su lokacijama zabilježene veće vrijednosti lutajućih struja nakon prolaska tramvajskog vozila [18]. Na slici 6. prikazani su rezultati svih mjerenja na lokaciji Žitnjak. Uski, šiljasti vrhovi ("pikovi") predstavljaju vrijednosti struja koje su zabilježene prolaskom tramvaja [18].



Slika 6. Mjerenja provedena na lokaciji Žitnjak [18]

Budući da struja izlazi iz tračnica jer pronalazi put manjega otpora i kroz tlo ulazi u metalne konstrukcije u blizini kolosijeka te se preko njih vraća u elektrovođnu podstanicu [21], možemo pretpostaviti da se u blizini mjesta gdje su zabilježene veće vrijednosti lutajućih struja nalazi potencijalno mjesto izlaska struje iz tračnice te ono odgovara mjestu ulaska struje u cjevovod. Na lokaciji Žitnjak to bi bio slučaj u blizini mjernih mjesta 4 i 8 (slika 7.).



Slika 7. Najveće vrijednosti dinamičkih lutajućih struja izmjerene na mjernim točkama, lokacija: Žitnjak [18]

3 Monitoring lutajućih struje

3.1 Mjere smanjivanja lutajućih struja

Da bi se učinkovito odredile mjere koje treba provesti radi smanjivanja utjecaja lutajućih struja i otkrivanja potencijalno opasnih mjesta, mora se provesti analiza cijeloga sustava. Dobro održavanje kolosijeka i planirana mjerenja lutajućih struja moraju biti ispravno provedena kako bi se održala visoka otpornost na lutajuće struje [22]. Krajnji je cilj zaštititi tračničke sustave te okolne metalne konstrukcije od korozije. Međutim, zbog dinamičke prirode lutajućih struja, ponekad je teško kontrolirati istjecanje struje iz tračnice, naročito nakon što je kolosijek već nekoliko godina u uporabi [23]. Zbog toga se najviše provode određene mjere radi smanjivanja lutajućih struja na izvoru, od kojih navodimo najučestalije, prema [24]:

- uporaba elastomernih podložaka ispod tračnica na mjestima pričvršćenja tračnice
- potpuna izolacija tračničkoga pričvrsnog pribora kako bi se spriječio dodir metala kod kolosijeka s pojedinačnim osloncima tračnica
- kontinuirano zavarivanje tračnica
- manji razmak između elektrovnih podstanica
- oblaganje tračnica elastomernim materijalima
- ugradnja homogene elastične smjese kojom se osigurava pričvršćenje i električna izolacija cijelom duljinom kolosijeka kod kolosijeka s kontinuiranim oslanjanjem tračnica
- uporaba sustava za prikupljanje lutajućih struja.

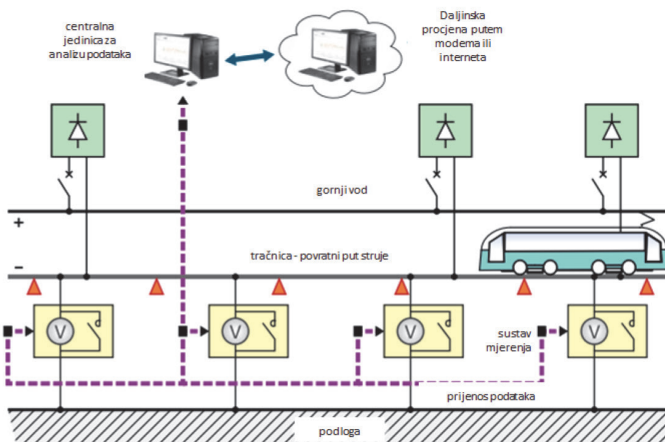
3.2 Održavanje dopuštene razine lutajućih struja

Električne karakteristike tračničkoga sustava trebale bi biti provjeravane na godišnjoj razini kako bi se utvrdile i ispravile sve eventualne nepravilnosti kolosijeka koje lutajuće struje mogu izazvati. Poželjno je uspostaviti monitoring, jer se na taj način može utvrditi otpornost tračnice prema tlu. Na taj se način detektira električna otpornost tračnice, tj. je li manja od potrebne, te ako jest, daljnjom se analizom utvrđuje zašto je došlo do smanjenja električne otpornosti [25]. Na klasičnim kolosijecima sa zastornom prizmom postoje određena iskustva u održavanju kolosijeka radi sprečavanja lutajućih struja, a temeljni su koraci koji se provode, prema [26]:

- vizualni pregled kako bi se otkrila mjesta na kojima dolazi do istjecanja lutajućih struja te omogućilo sprečavanje istjecanja,
- provjera stanja izolacije tračnice i pričvrsnoga pribora, što se može uočiti tijekom vizualnog pregleda,
- održavanje čistoga i suhog zastornog materijala, što se postiže kontroliranim održavanjem i pravilnom odvodnjom kolosijeka,
- provođenje redovitih ispitivanja u koordinaciji s konzultantima za koroziju kako bi se utvrdilo stanje kolosijeka.

3.2.1 Sustav za monitoring lutajućih struja

Radi provođenja neprestanih kontrola lutajućih struja razvijeni su sustavi za monitoring lutajućih struja (eng. Stray current monitoring system – SCMS). Uzduž kolosijeka postavljaju se uređaji koji pomoću senzora mjere električni potencijal između tračnice te medija u kojemu se tračnica nalazi.



Slika 8. Shematski prikaz sustava za monitoring lutajućih struja [27]

Podaci se dostavljaju na računalo (slika 8.) na kojemu se vrši automatska analiza snimljenih vrijednosti te se uključuje alarm ako dođe do izmjerenih većih intenziteta lutajućih struja. Podaci se mogu prikazivati u različitim dijagramima (izmjerene vrijednosti u vremenu, po mjernim mjestima i sl). Sustav mora sadržavati dovoljno memorije kako bi se sačuvali svi trenutno izmjereni podaci barem 16 tjedana, a prosječne izmjerene vrijednosti 10 godina. Prije ugradnje ovakvoga sustava praćenja lutajućih struja mora se provesti nulto mjerenje na novom kolosijeku [27].

3.1.2 Postojeći pravilnici i smjernice

Prema priručniku za projektiranje metroa u SAD-u prije izgradnje novih linija željezničke infrastrukture treba izraditi Elaborat o utjecaju korozije zbog lutajućih struja kojim bi se utvrdio potencijalni štetni učinak korozije na željezničku infrastrukturu, kao i na okolne metalne konstrukcije. Radi izrade ovakvoga elaborata treba dobiti uvid u sve metalne konstrukcije u blizini planirane pruge i mjere sprječavanja korozije koje se na tim konstrukcijama provode [7]. Kontrolu lutajućih struja treba usmjeriti na sprječavanje istjecanja struja iz tračnica, a mjere sprječavanja ovise o tipu kolosijeka [7]:

Kod kolosijeka sa zastornom prizmom treba izolirati podložnu čeličnu ploču i pričvrtni pribor kako bi se osigurala dobra otpornost tračnice prema podlozi.

Kod kolosijeka na čvrstoj podlozi izolacija se ostvaruje između tračnice, odnosno pričvršćenja, i betonske podložne ploče ili između betonske podložne ploče i tla pomoću izolacijskih materijala. Također, može se izvoditi i oblaganje tračnice elasto-mernim materijalima.

Kada je riječ o direktnom pričvršćenju tračnice, lutajuće se struje sprječavaju izolacijom pričvrstnoga pribora. Izolaciju elemenata kolosijeka treba održavati tijekom cijeloga projektnog razdoblja konstrukcije. U nekim je smjernicama propisana vrijednost minimalne dopuštene električne otpornosti između tračnice i podloge – u tunelima ne smije biti manja od 10 Ω /km, odnosno od 2 Ω /km na otvorenoj pruzi. Treba osigurati da prosječna vrijednost lutajućih struja po jedinici duljine za jednokolosiječne pruge ne premašuje 2,5 mA/m [8].

4 Daljnja istraživanja

Preliminarnim mjerenjima lutajućih struja na cjevovodima položenima u neposrednoj blizini tramvajske mreže SCM uređajem [18] ustanovljeno je postojanje dinamičkih lutajućih struja na mreži tramvajske infrastrukture u gradu Zagrebu. Da bi se ove izmjerene vrijednosti smanjile, a posljedice djelovanja lutajućih struja svele na minimum, daljnjom analizom treba utvrditi najkritičnija mjesta na kojima se događaju degradacije kolosijeka uzrokovane ovim načinom korozije. Budući da se veći intenziteti lutajućih struja pojavljuju na mjestima ubrzanja i usporavanja tramva-

ja, pretpostavka je da će se najveće degradacije javljati upravo na najprometnijim mjestima, gdje prometuje najveći broj tramvajskih linija te gdje, zbog kombinacije tramvajskoga i cestovnog prometa, tramvaji konstantno ubrzavaju i usporavaju (npr. Ilica, Vlaška ulica, Savska cesta). Analizom gustoće tramvajskoga prometa te zadnjih provedenih rekonstrukcija tramvajske mreže možemo utvrditi koja su potencijalno opasna mjesta nastanka korozije te na temelju mjerenja lutajućih struja i utvrđivanjem stanja kolosijeka provjeriti točnost postavljene pretpostavke. Na tim mjestima, s obzirom na intenzitet izmjerene lutajuće struje i obližnjih podzemnih metalnih konstrukcija (vodovod, plinovod), treba predvidjeti (osigurati) najprikladniji način sprječavanja lutajućih struja te daljnji monitoring. Daljnja istraživanja temeljit će se na analizi korozije na najugroženijim mjestima pričvršćenja te kako modifikacijom svojstava izolacijskih materijala pričvrsnoga pribora spriječiti istjecanje lutajućih struja i zaustaviti njihove štetne posljedice na tramvajskim kolosijecima. Degradacije tračnica na mjestima pričvršćenja uzrokovane djelovanjem lutajućih struja imaju veliki utjecaj i na sigurnost odvijanja prometa.

5 Zaključak

U Zagrebačkom električnom tramvaju (ZET-u) prepoznat je problem korozije uzrokovane lutajućim strujama. Međutim, još se uvijek nije sustavno pristupilo pronalaženju učinkovitog rješenja. Budući da je tramvajska pruga u Zagrebu u najvećem dijelu zatvorena armiranobetonskim montažno-demontažnim pločama, takve se degradacije ne mogu uočiti sve dok se kolosijek ne otvori te vizualno izvrši pregled tračnica i pričvrsnoga pribora. Degradacija bi se mogla ustanoviti kad bi postojala mjerenja geometrije kolosijeka pod opterećenjem, jer bi se u tom slučaju detektirala oštećenja na mjestima pričvršćenja. Naime, na ovako oštećenim pozicijama bilo bi zabilježeno povećano proširenje kolosijeka. U Hrvatskoj ne postoje smjernice kojima bi se definirali načini monitoringa i spječavanja lutajućih struja, dok je u svijetu na taj problem stavljen veliki naglasak. Budući da su lutajuće struje interdisciplinarno područje i da ne predstavljaju opasnost samo tramvajskoj infrastrukturi već i svim metalnim konstrukcijama postavljenima u blizini kolosijeka, istraživanja provedena radi smanjivanja lutajućih struja na izvoru mogu predstavljati uvod u daljnje studije i projekte provođenja monitoringa i zaštite od korozije lutajućih struja na svim ugroženim konstrukcijama. Takve projekte treba provoditi u suradnji sa svim operatorima kojima lutajuće struje stvaraju velike troškove održavanja te inspektorima zaduženima za sigurnost odvijanja prometa.

Literatura

- [1] Ogunsola, A., Mariscotti, A., Sandrolini, L.: Estimation of stray current from a DC-electrified railway and impressed potential on a buried pipe, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27 (2012) 4, pp. 2238–2246.
- [2] Bertolini, L., Carsana, M., Pedferri, P.: Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current, *Corrosion Science*, 49 (2007) 3, pp. 1056–1068.
- [3] Niasati, M., Gholami, A.: Overview of stray current control in dc railway systems, *Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age*, International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age, pp. 237–242, 2008.
- [4] Oštrić, D., Cvitanović, I., Ferlak, B.: Daljilnsko vođenje sustava katodne zaštite Jadranskog naftovoda, 17. međunarodno savjetovanje HDO Održavanje 2011., pp. 196–202, 2011.
- [5] Predavanje: Serdar, M., Baričević, A.: *Mehanizam korozije metala*, 2017.
- [6] Office of Rail Regulation, *Tramway Technical Guidance Note 3: Design Standards Stray Current Management*
- [7] *Metro Design criteria manual*; Metro Light Rail Transti Projects, 2007.
- [8] RTA: *Dubai Rail Planning&Design Guidelines, Guidelines and Design Principles for Railway Projects undertaken by Developers in the Emirate of Dubai*, 2013.
- [9] Transport Asset Standards Authority, *Guide: Electrolysis from stray DC current*, 2014.
- [10] Revie W.R., Uhlig H.H.: *Corrosion and corrosion control*, Wiley-Interscience, 2008.
- [11] Shipley, W.R., Darwin, D., Locke, E.C.: *Stray current corrosion due to utility cathodic protection*, University of Kansas Center for Research, Technical Report, 1997.
- [12] Yu, J.G., Goodman, C.J.: *Stray Current Design Parameters for Dc Railways*, Railroad conference, Atlanta, USA, pp. 19–28, 1992.
- [13] Thomas, J.B., Zdunek, D.A.: *Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems - Final Report*, 1995.
- [14] Lakušić, S., Haladin, I., Škare, L.: *Novi sustavi pričvršćenja kolosijeka na tramvajskim prugama u Zagrebu, Kvalitea prometne infrastrukture - ključ razvoja gospodarstva*, ur. Stjepan Lakušić, Dani prometnica, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb, pp. 39-60, 2015.
- [15] Vranješević, M.: *ZET - Korozija tramvajskih tračnica i pričvrsnog pribora, radni materijal*, 2014.

- [16] Lakušić, S., Haladin, I., Koščak, J.: Izvještaj o kontroli stanja gornjeg ustroja kolosijeka na ispitnoj dionici tramvajske pruge na Savskoj ulici, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [17] Lakušić, S., Haladin, I., Vranešić, K.: Zagreb 21-CTT: novi sustav pričvršćenja kolosijeka za smanjenje vibracija te povećanje otpornosti na lutajuće struje, Automatizacija u prometu 2016, ur. Željko Šakić, Krapina, KoREMA, pp. 1–4, 2016.
- [18] Serdar, M., Vidov, V., Bjegović, D.: Analiza lutajućih struja i utjecaj na koroziju metala u zoni prometne infrastrukture, Mjerenja, ispitivanja i monitoring na prometnicama, ur. Stjepan Lakušić, Dani prometnica, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb, pp. 453–513., 2013-
- [19] Ivanković, A., Martínez, S., Kekez, K.: Detekcija štetnih učinaka statičkih i dinamičkih lutajućih struja SCM uređajem, International conference Exchanging experiences in the fields of corrosion, materials and environmental protection, (ur. Lačnjevac, Č.), pp. 107-114.
- [20] Radiodetection Ltd Western Drive Bristol BS14 OAZ, UK, Stray Current Mapper User Manual, 2011.
- [21] Zakowski, K., Darowicki, K.: Stray Currents and Pollution of the Environment,” Polish Journal of Environmental Studies, 8 (1999) 4, pp. 209–212-
- [22] Memon, S.: Understanding stray current mitigation, testing and maintenance on DC powered rail transit systems, Joint Rail Conference, Knoxville, Tennessee, USA, pp. 1–7, 2013-
- [23] Memon, S., Clarner, G., Fromme, P.: Stray Current Mitigation and Collection Techniques Adopted by a DC Transit Agency and Its Effectiveness in Controlling Stray Currents, International Conference on Transportation and Development, Houston, Texas, Transportation & Development Institute, pp. 640–650, 2016
- [24] Memon, S., Fromme, P.: Stray Current Corrosion and Mitigation: A synopsis of the technical methods used in DC transit systems, IEEE Electrofication Magazine, 2 (2014) 3, pp. 22–31-
- [25] Zan, K., Mawley, V., Ramos, M., Singh, S.: Recommended Maintenance Practices for Stray Current Corrosion on DC Electrified Systems, Joint Rail Conference, Colorado Springs, Colorado, USA, 2014.
- [26] Memon, S.A., Fromme, P.: Stray Current Corrosion Mitigation, Testing and Maintenance in dc Transit System, International Journal of Transport Development and Integration, 1 (2017) 3, pp. 511-519-
- [27] Brošura; Secheron: SCMS Stray Current Monitoring System

Primjena programskoga paketa Abaqus u znanstvenom radu na Građevinskom fakultetu u Zagrebu

doc.dr.sc. **Mario Uroš**¹, izv.prof.dr.sc. **Davor Skejić**², dr.sc. **Krunoslav Pavković**³, dr.sc. **Ivan Lukačević**⁴

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

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

³ Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, krunoslav.pavkovic@tvz.hr

⁴ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ica@grad.hr

Sažetak

U radu će se dati kratki pregled znanstvenih projekata i uvid u mogućnosti numeričkih proračuna za potrebe znanstvenih projekata. Predstavljena su četiri znanstvena rada izrađena na doktorskom studiju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu čiji su numerički proračuni napravljeni u programskom paketu Simulia Abaqus, koji je jedan od široko primjenjivanih programa opće namjene za numeričke simulacije. Prikazat će se samo najosnovniji podaci o numeričkim modelima i metodama njihovoga rješavanja, s naglaskom na specifične detalje koji su vezani za svako pojedino područje istraživanja.

Ključne riječi: Simulia Abaqus, numerički model, metoda konačnih elemenata

Application of Abaqus software in scientific research work at the Faculty of Civil Engineering in Zagreb

Abstract

A brief overview of scientific projects and possibilities available for numerical calculations on such projects is provided in this paper. Four doctoral theses from the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, are presented. Numerical calculations for these theses were made using the Simulia Abaqus program package, which is one of the widely used general-purpose software programs for numerical simulations. Only the most important numerical model data and solution methods are given in the paper, and an emphasis is placed on specific details that are related to each area of research.

Key words: Simulia Abaqus, numerical model, finite element method

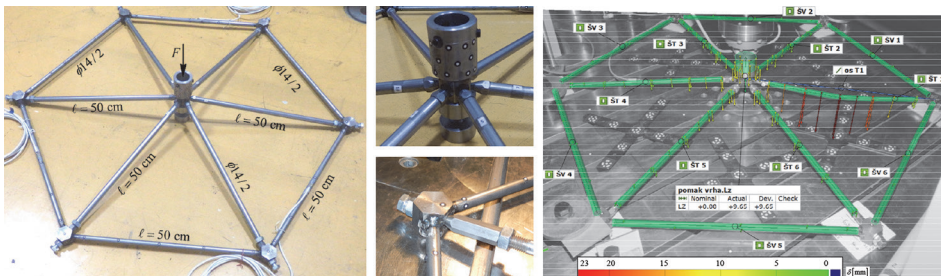
1 Uvod

U novije je vrijeme znanstveni rad postao gotovo nezamisliv bez uporabe računala. Razvojem numeričkih metoda u matematici do punoga su izražaja došle glavne prednosti računala, a to su brzina obrade podataka i veliki memorijski kapacitet. U novije vrijeme postoji znatan broj programskih paketa koji su prilagođeni pojedinih područjima znanstvenoga istraživanja. U području građevinarstva, kao i cijele tehničke struke, programi utemeljeni na metodi konačnih elemenata trenutačno imaju najširu primjenu. Simulia Abaqus (Dassault Systèmes) [1] jedan je od takvih programskih paketa koji se rabe za numeričke simulacije raznih fizikalnih procesa. U ovom su radu predstavljena četiri znanstvena rada izrađena na doktorskom studiju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u sklopu teme doktorskog rada, s naglaskom na provedeni numerički proračun.

2 Analiza izbočenja na nosivost rešetkaste kupole

2.1 Uvod i opis modela

U doktorskom radu [2] analiziran je utjecaj složenoga izbočenja na nosivost rešetkaste kupole. Proveden je postupak eksperimentalnoga ispitivanja čvora rešetkaste kupole uz numeričke proračune. Model se sastoji od šest zglobno spojenih štapova promjera 14 mm i debljine stijenke 2 mm oslonjenih na vlačni prsten koji u prostoru tvore oblik piramide s vrlo malom visinom srednjega čvora (slika 1.). Geometrija sustava definirana je tako da teorijski dolazi do istodobnoga izvijanja svih tlačnih štapova i proboja središnjega čvora zbog vertikalne sile u njemu. Ova se pojava naziva složenim izbočenjem i poznato je da je u tom slučaju osjetljivost konstrukcije na imperfekciju velika, te da mala promjena ulaznih parametara uzrokuje veliku promjenu u nosivosti sustava [3]. Jedan je od ciljeva uspostaviti međusobnu ovisnost amplitude i oblika imperfekcije sa smanjenjem nosivosti rešetkaste jednoslojne kupole.



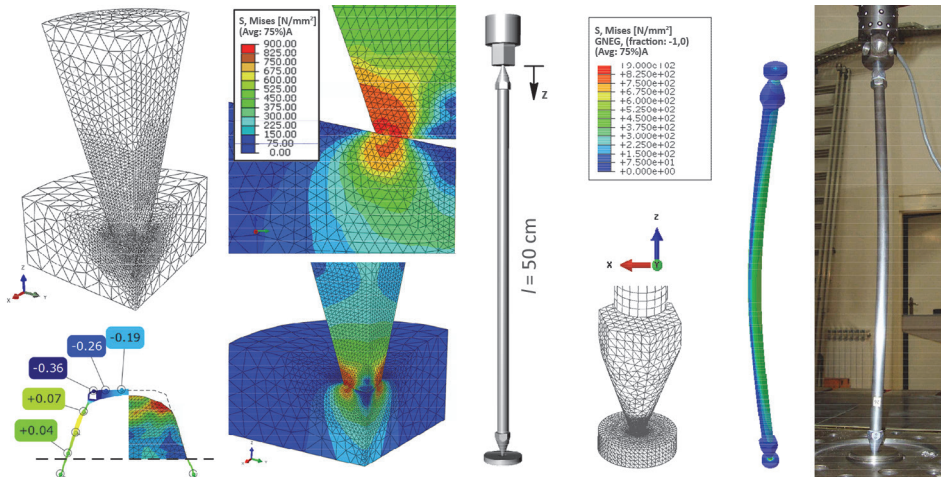
Slika 1. Fizički model rešetkaste kupole i prikaz rezultat optičkih mjerenje

S obzirom na to, od velikoga je značaja točnost mjerenja početne geometrije cijelog sustava. Optička mjerenja geometrije provedena su sustavom Tritop tvrtke Topomatika d.o.o. u karakterističnim fazama opterećenja, čime se dobio realni oblik rešetke sa svim njezinim geometrijskim imperfekcijama koje su upotrijebljene pri izradi numeričkih modela (slika 1.). Zbog osjetljivosti sustava na imperfekcije, proračuni i ispitivanja provedeni su na tri razine modela: kontakti spoj, štapni element i rešetkasta kupola, kako bi se odredio utjecaj svake pojedine komponente.

U modelu su se nastojala izbjeći dodatna mjesta unosa imperfekcija, te osigurati centrični prijenos opterećenja u spojevima. Ostvaren je točkasti spoj kontaktom metalnoga stošca i udubljenja u elementima čvorova. Vijci u čvorovima služe za "fino" namještanje visine rešetkaste kupole. Njihov je vrh zakaljen, čime im se povećala tvrdoća, a time se utiskivanje svelo na minimum. Širenje vlačnoga prstena omogućeno je izvedbom kliznih spojeva u horizontalnoj ravnini pomoću glatkih dodirnih ploha (slika 1.). Eksperimentalno je ispitivanje provedeno na statičkoj preši kontroliranim prorastom pomaka. Kao rezultat je dobivena ravnotežna krivulja čvora na temelju koje će se vršiti usporedbe s numeričkim modelima.

2.2 Numerički model

Numerički je proračun proveden u programskom paketu Abaqus 6.12 [1], dok su pojednostavljene analize radi praktične primjene napravljene u programskom paketu SAP2000 [4], a ovdje se neće opisivati. Kod modela je na svim razinama upotrijebljena geometrijski i materijalno nelinearna statička analiza uz kontrolu pomaka iteracijskom Newton-Raphsonovom metodom. Upotrijebljeni su volumni konačni elementi u obliku heksaedra s 8 čvorova i isto toliko Gaussovih točaka integracije. Provedeno je ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala i dobivene su sljedeće karakteristike: modul elastičnosti $E = 205$ GPa, granica tečenja $f_y = 404$ MPa i granica loma $f_u = 626$ MPa. Na slici 2. prikazani su lokalni modeli kontaktnoga spoja i izdvojenog štapa rešetke s karakterističnim rezultatima i područjima plastifikacije materijala.

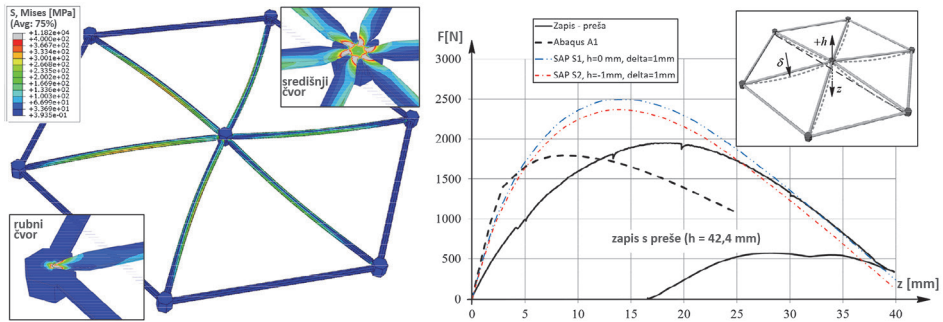


Slika 2. Numerički model detalja spoja i lokalni model štapa rešetke

U modelu su definirana razna kinematička ograničenja te ograničenja na kontaktnim ploham dvaju susjednih elemenata. Svojstva kontakta definirana su u tangencijalnom i normalnom smjeru u odnosu na ravninu kontakta. Radi što vjernije reprodukcije fizičkoga modela optički mjerena geometrijska imperfekcija preslikana je na čvorove numeričkih modela.

2.3 Rezultati i zaključak

Na temelju numeričkih proračuna prikazane su ravnotežne krivulje pri opterećenju središnjega čvora (slika 3.) te je dana usporedba s eksperimentalnim rezultatima. Također je prikazano stanje naprezanja u elementima rešetke te područja plastifikacije u čvorovima rešetkaste kupole. Zbog velikoga broja provedenih eksperimentalnih ispitivanja i pripadnih numeričkih proračuna u ovom su radu prikazani rezultati samo za slučaj jedne početne geometrije sustava. Za model u programskom paketu Abaqus imperfekcija je reproducirana prema rezultatima optičkih mjerenja. Modeli u programskom paketu SAP2000 znatno su jednostavniji i praktično su primjenjivi kod proračuna realnih konstrukcija, a samim time ne predstavljaju realnu imperfekciju već zamjensku (visine čvora w i odstupanje osi štapa od pravca δ). Tako npr. krivulja S1 predstavlja najčešće rabljeni model pri projektiranju ovakvoga sustava. Može se uočiti da bi primjenom takve krivulje nosivost bila precijenjena oko 25 %.



Slika 3. Naprezanja u elementima rešetkaste kupole i ravnotežne krivulje točke vrha rešetke

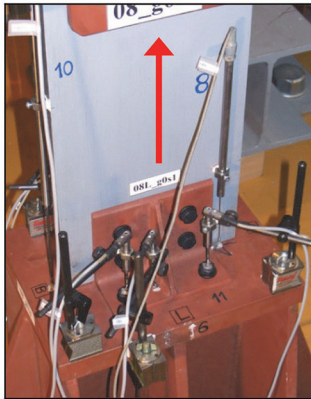
Složeniji numerički model daje dosta dobru procjenu nosivosti, ali i ovdje se može uočiti odstupanje ravnotežne krivulje od ekperimentalne u pomacima pri gubitku stabilnosti. Razlika se može objasniti imperfekcijama na kontaktnim plohami i nejednolikom plastifikacijom vrhova stožaca u čvorovima (razina ukupnoga utiskivanja na spoju je oko 0,2 mm). Također, početno "namještanje" sustava pri ispitivanju te vijčani spojevi imaju nezanemarliv utjecaj na iznos vertikalnog pomaka. Takve imperfekcije, iako minimalne, imaju značajnu ulogu na ponašanje i nosivost konstrukcije u području složenoga izvijanja gdje je ona i najosjetljivija.

3 Procjena pouzdanosti priključaka nosač-stup izvedenih kutnicima

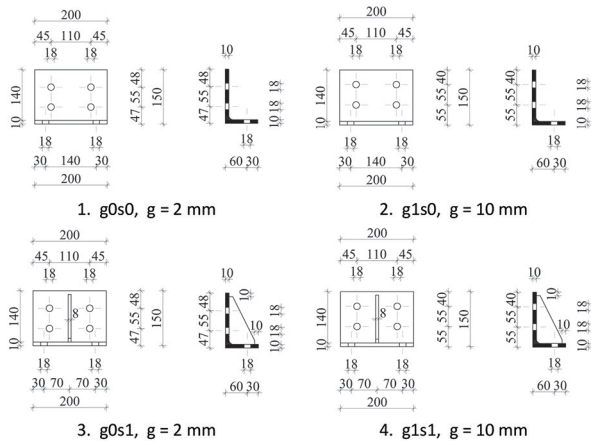
3.1 Uvod

Jedna od važnijih komponenata vijčanih čeličnih priključaka nosač-stup izvedenih s pojasnim kutnicima gornji je kutnik u savijanju. Karakterizacija te komponente može se procijeniti ponašanjem analognoga T-komada (para kutnika) u vlaku. Ponašanje vijčanih spojeva s T-komadom izrazito je nelinearno, a obuhvaća složene fenomene kao što su plastičnost materijala, učinci 2. reda i jednosmjerni kontaktni rubni uvjeti [5]. Osim navedenih učinaka i nelinearnosti kod priključaka s pojasnim kutnicima pojavljuje se i fenomen proklizavanja koji u kombinaciji s prednapinjanjem vijaka postaje još izraženiji. U nastavku je za simulaciju ponašanja pojasnih kutnika u vlaku opisan postupak primjene numeričkog modela uporabom FE paketa Abaqus [1]. Ovi su modeli kalibrirani i vrednovani usporedbom s rezultatima laboratorijskih ispitivanja provedenih na Građevinskom fakultetu u Zagrebu [6]. Kako bi se dobilo realno F- Δ ponašanje različitih konfiguracija kutnika u savijanju, ovisno o razmaku između nosača i pojasnice stupa, g, razmotrene su dvije osnovne grupe uzoraka (g_0 i g_1). U konačnici su razmotrene četiri grupe uzoraka, dvije bez ukrućenja (g_0s_0 i g_1s_0), i dvije s ukrućenjem (g_0s_1 i g_1s_1), slika 4. Svi uzorci kutnika izrađeni su iz istog profila L 150x90x10, kvalitete čelika S 235 JR. Upotrijebljeni su nominalno isti vijci M16

x 90, kv.10.9, koji su bili pritegnuti na 20 % vlačne otpornosti. Uzorci para kutnika opterećeni su statičkom vlačnom silom tako da je ostvaren simetričan unos sile u oba kutnika [6].



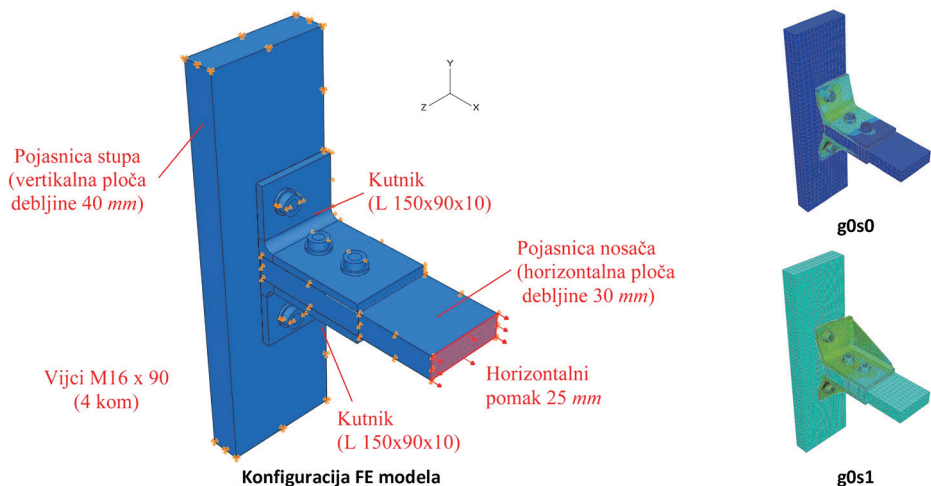
Ispitivanje para kutnika u vlaklu



Slika 4. Ispitivanje para kutnika u vlaklu i geometrijska svojstva laboratorijskih uzoraka po grupama

3.2 Numerički model

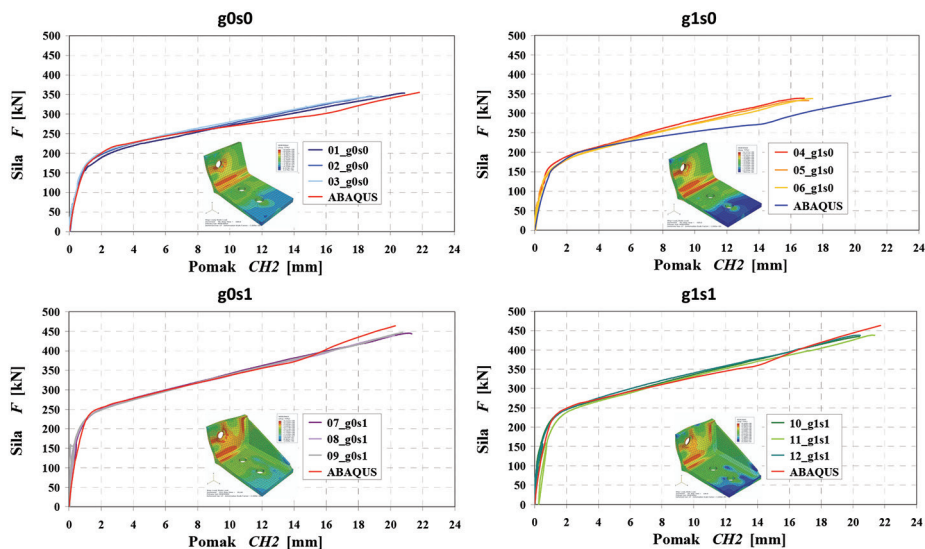
Modelirana je polovica spoja primjenom simetrije oko polovice svakoga od kutnika. Rubni uvjeti modela i prikaz unosa opterećenja vide se na slici 5. Opterećenje je uneseno kao vanjski pomak horizontalne ploče koja predstavlja pojasnicu nosača u stvarnoj funkciji u priključku. Realni uvjeti opterećivanja modelirani su u 3 faze; prve dvije - prednapinjanje vijaka i 3. - opterećivanje uzorka preko linearnoga unosa pomaka. Mehanička svojstva čeličnih komponenata (kutnika, ploča i vijaka) određena su iz vlačnih ispitivanja svojstava materijala [6]. Svi modeli su diskretizirani uporabom C3D8I osmeročvornih "brick" elemenata s punom integracijom i inkompatibilnim modovima. C3D6 šesteročvorni "wedge" elementi upotrijebljeni su za modeliranje tijela vijaka. Upotrijebljena su tri elementa po debljini krakova kutnika kako bi se što bolje obuhvatilo deformacijsko ponašanje. Kontakt između svih dijelova modeliran je eksplicitno. Opća formulacija za kontakt u Abaqusu uključuje tip "master-slave" algoritma [1]. Kontaktne su površine tijelo vijaka - rupe za vijke i glava (matica) vijaka - komponente te ostale komponente u kontaktu ploča - ploča.



Slika 5. Rubni uvjeti, unos opterećenja i deformirani modeli u trenutku otkazivanja

3.2 Rezultati i zaključak

Na slici 6. dane su usporedbe s laboratorijskim rezultatima koji predstavljaju odvajanja kutnika od pojasnice stupa, odnosno krivulje $F - \Delta$.



Slika 6. Krivulje $F - \Delta$ - usporedba numeričkih i laboratorijskih rezultata

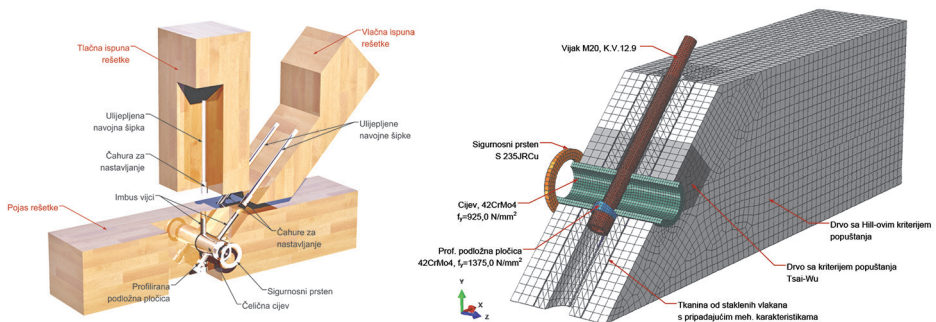
Numerički rezultati izuzetno se dobro poklapaju s eksperimentalnima za sve grupe uzoraka osim za uzorke s kutnicima g1s0. Za tu grupu uzoraka odstupanja se javljaju tek nakon postkritičnoga područja gdje numeričke simulacije daju znatno mekši odgovor, ali je dobiveni deformacijski kapacitet puno veći. Kraj numeričkih krivulja, odnosno deformacijski kapacitet uzoraka određen je primjenom kriterija otkazivanja koji su detaljno objašnjeni u [5, 6].

Opisani numerički modeli daju zadovoljavajuću procjenu ponašanja svih analiziranih parova kutnika u vlaku. Uz dodatne parametarske analize na ovako definiranim FE modelima mogu se uz male troškove (materijalne i vremenske) razviti još pouzdanija pravila za projektiranje priključaka s pojasnim kutnicima.

4 Složeni priključak drvenih rešetkastih nosača

4.1 Uvod

Cilj je bio pronaći kvalitetno rješenje priključka koji će svojim mehaničkim karakteristikama biti primjenjiv za rešetkaste nosače, a ponajprije za rešetkaste nosače velikih raspona. Predloženi priključak za rešetkaste konstrukcije do sada nije istražen ni upotrijebljen u inženjerskim konstrukcijama (slika 7.). Sastoji od spojnoga sredstva velikog promjera koje se montira u pojas rešetke, ulijepljenih šipki u ispune rešetke te odgovarajućega broja vijaka kojima se povezuje pojas i ispune rešetke [7].



Slika 7. Ilustracija priključka čija su svojstva istraživana i prikaz numeričkog modela

Numeričke analize provedene su programskom podrškom Abaqus/CAE ver. 6.10 [1] s podrutinom UMAT. Podrutinom UMAT definirano je ortotropno elastoplastično ponašanje drva s kriterijima popuštanja: Tsai-Wu i kriterijem popuštanja razvijenim iz Hillovoga kriterija popuštanja. Otvaranje pukotine u drvu zbog vlačnih napreznja okomito na vlakanca i posmičnih paralelno s vlakancima modelirano je preko kohezijskih površina. Čelični elementi modelirani su kao homogeni elastoplastični materijali, a plastično područje definirano je preko dvadeset točaka. Svrha složenih

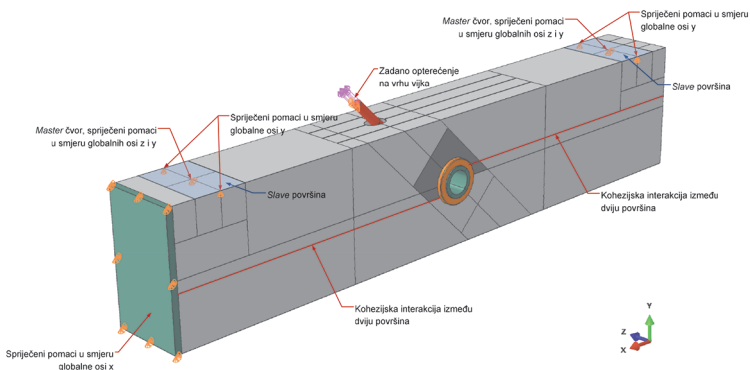
numeričkih modela bila je dobivanje složenih oblika otkazivanja priključka te dobivanje rezultata sa što manjim odstupanjem u odnosu na eksperimentalne, koji se mogu upotrijebiti za parametarsku analizu.

4.2 Opis numeričkoga modela s unosom sile pod kutom od 45° u odnosu na vlakanca

Drvo je modelirano konačnim elementima C3D8 i C3D6. Zbog složene geometrije drva u području oko rupe primijenjeni su elementi C3D6, jer je njima lakše definirati ovako složenu geometriju, a za ostatak su upotrijebljeni elementi C3D8. Na modelu su izvedeni utori u drvu širine 1,0 mm, duljine 400,0 mm, visine 200,0 mm, pozicionirani na sredinu drvenoga uzorka. Tkanina je modelirana debljine 1,0 mm, duljine 400,0 mm te visine 200,0 mm. Za modeliranje tkanine upotrijebljeni su konačni elementi C3D8. Sve pukotine definirane su preko kohezijske interakcije dviju ploha. Numerički model napravljen je s 45 kontaktne površine, a od toga je 38 kohezijskih površina (slika 7.).

Rubni uvjeti numeričkih modela zadani su tako da geometrijski odgovaraju eksperimentalno ispitivanim uzorcima. Numerički model pridržan je u X smjeru sa čeličnom pločom kojoj su spriječeni pomaci u svim smjerovima, a na koju je oslonjen model priključka. Pomaci u Z i Y smjerovima riješeni su preko *slave* površina, svi čvorovi koji se nalaze na dvjema površinama dimenzija 80,0 mm × 120,0 mm na osnovom razmaku 800,0 mm, preko *slave* naredbe, spojeni su na *master* čvorove koji su naznačeni strelicama, a ograničen im je pomak u Z i Y smjerovima (slika 8.).

Opterećenje na priključak modelirano je preko vijka kao pritisak od 6,49612 N/mm² u smjeru normale na površinu vijka. Zadani pritisak na površini vijka 153,9 mm² odgovara sili od 1000,0 N. Porast sile s vremenom u numeričkom modelu vođen je preko amplitude u ovisnosti o vremenu.



Slika 8. Rubni uvjeti numeričkog modela

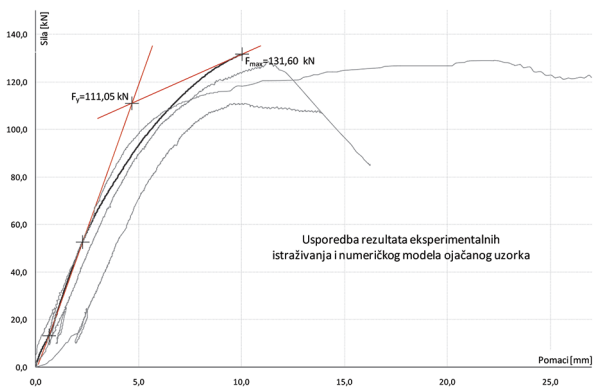
Numeričke analize uključuju geometrijsku i materijalnu nelinearnost. Za kontrolu sile primijenjena je Newton-Raphsonova metoda. Korak prirasta sile proveden je automatskom kontrolom, s time da je maksimalan korak ograničen na 0,25 t, a početni je postavljen na 0,1 t. Sila je modelirana s linearnim prirastom u jedinici vremena.

4.3 Rezultati i zaključak

Rezultati numeričkoga modela za ojačani priključak s unosom sile pod kutom od 45° u odnosu na vlakanca prikazani su u grafikonu (slika 9.). Rezultati su dani do trenutka otkazivanja uzorka zbog otvaranja pukotine uzrokovane vlačnim naprezanjima okomito na vlakanca i posmičnim paralelno s vlakancima.

Analizom rezultata dobivene su mehaničke karakteristične veličine: maksimalna sila $F_{\max} = 131,00$ kN, sila popuštanja $F_y = 123,68$ kN, krutost $K_s = 14,54$ i duktilnost $D = 2,79$.

Numeričkim modelom dobiven je oblik otkazivanja priključka uzrokovan otvaranjem pukotine u sredini uzorka zbog vlačnih naprezanja okomito na vlakanca i posmičnih naprezanja paralelno s vlakancima. Inicijalne pukotine koje su se otvorile u blizini spajala zaustavljene su, odnosno širile su se manjom brzinom zbog utjecaja tkanine koja je preuzela vlačna naprezanja. Daljnjim prirastom opterećenja iznad 90,0 kN uslijedilo je ubrzano širenje pukotine zbog interakcije posmičnih i vlačnih naprezanja.



Slika 9. Usporedba rezultata eksperimentalnih istraživanja i numeričkoga modela ojačanog uzorka

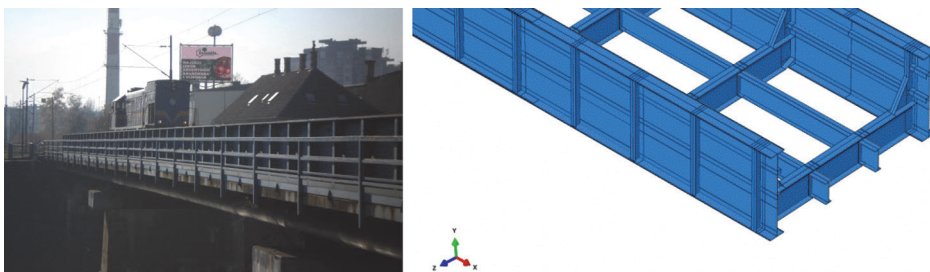
Nadalje, numeričkim modelima opisanima u prethodnim poglavljima ostvareno je vrlo dobro podudaranje s eksperimentalnim istraživanjima kao što je vidljivo iz rezultata. Ovime se može zaključiti da numerički modeli koji adekvatno obuhvaćaju oblike otkazivanja drva u određenoj mjeri mogu zamijeniti eksperimentalna istraživanja.

5 Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izloženih umoru

5.1 Uvod i opis modela

U doktorskom radu [8] istraživanje obuhvaća model procjene umora vezan na nominalna naprezanja i krivulje S-N i ponajprije je usmjereno na ujednačavanje razina pouzdanosti različitih konstrukcijskih detalja budućih čeličnih konstrukcija izloženih umoru. Općenito je model procjene umora izložen nepouzdanostima na strani otpornosti i na strani djelovanja. Nepouzdanosti otpornosti analizirane su stohastičkim postupcima na postojećim podacima ispitivanja. Kao rezultat ovog dijela istraživanja nepouzdanosti na strani otpornosti kvantificirane su i svrstane u određene skupine u ovisnosti kategorija detalja. Nepouzdanosti na strani djelovanja istražene su na temelju provedenih eksperimentalnih ispitivanja i simulacija na numeričkim modelima. Kao rezultat razvijen je postupak procjene pouzdanosti postojećih čeličnih konstrukcija izloženih umoru. Konačno, s kvantificiranim nepouzdanostima na strani otpornosti i na strani djelovanja formiran je stohastički model na temelju kojega su postupkom kalibracije izračunani optimalni skupovi parcijalnih faktora otpornosti i djelovanja.

Za potrebe istraživanja odabrana je konstrukcija čeličnoga željezničkog mosta "Kupa-Karlovac". Prema statičkom sustavu most se sastoji od dva kontinuirana zavarena nosača preko 3 raspona (32,20 + 38,42 + 32,02), ukupno 103,56 m. Širina mosta iznosi 5,50 m. Na temelju rezultata provedenih eksperimentalnih ispitivanja na postojećoj konstrukciji mosta formiran je numerički model metodom konačnih elemenata u komercijalnom programu Abaqus verzija 6.12 [1] koji je upotrijebljen za potrebe simulacija prolaza različitih shema opterećenja. Na slici 10. prikazana je konstrukcija mosta za vrijeme ispitivanja te slika dijela numeričkoga modela.

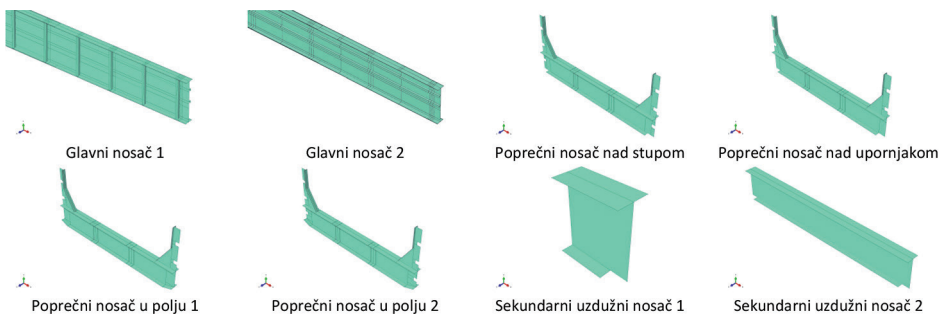


Slika 10. Konstrukcija mosta za vrijeme ispitivanja i dio numeričkog modela

5.2 Numerički model

Model mosta definiran konačnim elementima oblikovan je na temelju poznate geometrije konstrukcije. Nastojalo se obuhvatiti sve elemente konstrukcije koji direktno sudjeluju u prijenosu vertikalnoga prometnog opterećenja. Geometrija cijele konstrukcije dobivena je povezivanjem nekoliko posebno definiranih dijelova konstrukcije (slika 11.) u cjelinu, pri čemu su primijenjene master-slave veze tipa Tie.

U istraživanju je primijenjena statička analiza s koracima definiranim u ovisnosti o svakom pojedinom modelu opterećenja. Kako su u ovom dijelu istraživanja upotrijebljeni različiti modeli opterećenja od kojih je svaki karakteriziran s određenim brojem vozila, ukupno su analizirana 22 modela konstrukcije u ovisnosti o razmatranoj shemi vlaka iz modela opterećenja. Svaki se pojedini model sastoji od definirane geometrije i potprogramske ulazne datoteke "subrutine" u kojoj je definirano svako pojedino analizirano vozilo. Primjerice neki od analiziranih vlakova imali su duljinu preko 500 m, te uzevši u obzir duljinu mosta od 103 m i primijenjeni interval kretanja vozila od ~ 0,5 m dolazimo do broja od 1206 potrebnih koraka analize u jednom modelu.

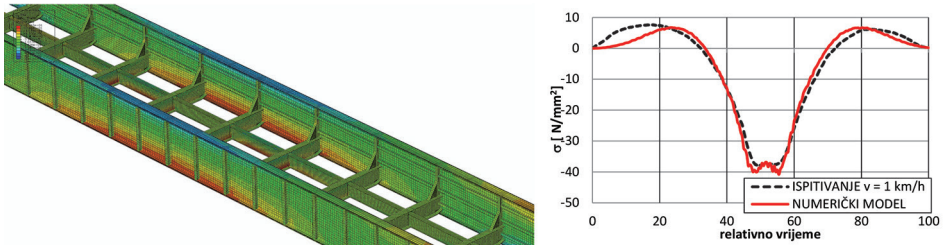


Slika 11. Dijelovi geometrije od kojih je oformljena geometrija cijele konstrukcije

Upotrijebljen je linearno elastičan materijal s modulom elastičnosti 210000 N/mm^2 i Poissonovim koeficijentom 0,3. Prema istraživanjima u [9] razmatran je utjecaj različitih tipova složenosti modela kod statičkih i dinamičkih analiza sličnih konstrukcija i zaključeno je da se uz pomoć plošnih elemenata mogu adekvatno modelirati konstrukcije za proračun umora utemeljen na nominalnim naprezanjima. Za potrebe analize konstrukcija izloženih umoru na temelju nominalnih naprezanja može se upotrijebiti jednostavna i relativno gruba mreža konačnih elemenata. Za modeliranje su upotrijebljeni linearni plošni elementi s četiri čvora reducirane integracije oznake S4R koji su rezultirali najboljim odgovorom u usporedbi s provedenim ispitivanjem. Rubni uvjeti modela definirani su prema statičkom sustavu konstrukcije mosta, a opterećenje je definirano kao statičko pomoću potprogramske ulazne datoteke "subrutine" DLOAD kojom je moguće definirati različite tipove opterećenja.

5.3 Rezultati i zaključak

Na temelju provedenih analiza iz svakoga od analiziranih modela može se u bilo kojemu konačnom elementu očitati dijagram naprezanje-vrijeme. Na slici 12. može se vidjeti grafički prikaz naprezanja u modelu konstrukcije za jedan korak analize i usporedba rezultata mjerenja i numeričkoga modela za prolaz lokomotive HŽ 2062 u kanalu CH_1 odnosno konačnom elementu 28392.



Slika 12. Naprezanja u konstrukciji za jedan korak analize i usporedba rezultata ispitivanja i numeričkoga modela

Kako je već spomenuto, analize su provedene za različite modele opterećenja. Prvo su provedene analize na temelju modela opterećenja formiranoga na realnom prometu. Na temelju ovih analiza oblikovan je stohastički model opterećenja za potencijalno kritična mjesta u konstrukciji koja nisu obuhvaćena ispitivanjem. Rezultati dobiveni na temelju ove faze istraživanja upotrebljavaju se za procjenu pouzdanosti postojećih konstrukcija. U drugoj su fazi provedene analize na temelju modela opterećenja definiranih u europskoj normi EN 1991-2 [10]. Cilj je ovih analiza oblikovanje stohastičkoga modela u različitim detaljima u konstrukciji. Zajedno s dobivenim rezultatima na temelju realnoga prometa podaci su upotrijebljeni za ujednačavanje razina pouzdanosti.

Oblikovani stohastički model na strani djelovanja sastoji se od baznih varijabli nepouzdanosti modela mjerenja opterećenja, nepouzdanosti numeričkog amodela i nepouzdanosti opterećenja u razmatranom detalju konstrukcije. Ako se usporede rezultati dobiveni ispitivanjem i numeričkim modelom, uočena su određena odstupanja. Ova odstupanja proizlaze iz činjenice da numerički model ne obuhvaća dinamičke učinke te činjenice da primijenjene sheme u numeričkim simulacijama potpuno ne opisuju stvarno opterećenje vlaka za koji je izvršeno ispitivanje. Međutim, ovi su nedostaci kod proračuna ekvivalentnih naponskih razlika uzeti u obzir dinamičkim faktorima te u probablističkim analizama pomoću faktora nepouzdanosti numeričkoga modela.

6 Zaključak

U radu je dan kratak osvrt na četiri doktorska rada izrađena na doktorskom studiju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Nastojalo se ukratko opisati problem pojedinog znanstvenog istraživanja i numeričke metode koje su upotrijebljene pri njegovu rješavanju. Naglasak je dan na numeričko modeliranje i mogućnosti koje ono pruža kao pomoćni alat pri istraživanju. U sklopu istraživanja predstavljen je programski paket Simulia Abaqus koji je utemeljen na metodi konačnih elemenata i jedan je od najzastupljenijih i najsofisticiranijih programskih paketa opće namjene koji se primjenjuju u znanstvenim istraživanjima. Iako je u radu težište bilo na konstrukcijama ili dijelovima konstrukcije, primjena numeričkog modeliranja široko je zastupljena i u svim ostalim područjima građevinarstva i cijele tehničke struke.

Literatura

- [1] Abaqus v.6.7-6.12.: Analysis Users Manual & Theory Manual, Dassault Systemes Simulia Corp.
- [2] Uroš, M.: Utjecaj složenog izbočenja na poslijekritično ponašanje rešetkastih kupola, Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [3] Gioncu, V.: Buckling of reticulated shells: state-of-art, *International Journal of Space Structures*, 10 (1995) 1, pp. 1–46.
- [4] SAP2000 v.15.1.: Analysis reference manual, Computers and Structures Inc., 2005. Berkeley, California, 2005.
- [5] Girão Coelho, A.M., da Silva, L.S., Bijlaard, F.S.K.: Finite-Element Modeling of the Nonlinear Behavior of Bolted T-Stub Connections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, pp. 918-928, June 2006.
- [6] Skejić, D.: Procjena pouzdanosti priključaka nosač-stup izvedenih kutnicima, Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [7] Pavković, K.: Složeni priključak drvenih rešetkastih nosača, Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [8] Lukačević, I.: Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izložene umoru, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [9] Lukić, M. et al: Bridge fatigue guidance-meeting sustainable design and assessment, Final report, European Commission, Research Fund for Coal and Steel, Luxembourg, 2013.
- [10] European Committee for Standardization (CEN), EN 1991-2: 2003, Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges, Final draft, Brussels, 2003.

Važnost međunarodne suradnje u znanstvenim istraživanjima

doc.dr.sc. **Marijana Serdar**¹

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

Sažetak

U izlaganju će biti prikazane neke od mogućnosti uključivanja doktoranada u rad međunarodnih institucija: sudjelovanjem u projektima, na doktorskim školama, konferencijama i radionicama te prijavljivanjem vlastitih projekata na programima hrvatskih i međunarodnih znanstvenih fondova. Kao primjer bit će prikazan doktorski rad blisko povezan s međunarodnom suradnjom u svim fazama istraživanja, od postavljanja hipoteze i ciljeva do izvornoga znanstvenog doprinosa relevantnog na međunarodnom istraživačkom području. Cilj je izlaganja upozoriti na važnost međunarodne suradnje već u ranim fazama doktorskoga studija, kao na priliku za profesionalno i osobno napredovanje u okviru vlastite institucije i izvan njega.

Ključne riječi: međunarodna suradnja, doktorski studij, znanstveni projekti, fondovi, konferencije

Importance of international cooperation in scientific research

Abstract

Some possibilities for involving PhD candidates in the work of international institutions are presented. These possibilities include participation in existing projects, doctoral schools, conferences and workshops, and submittal of their own projects for participation in programs organised in the scope of Croatian and international scientific funds. An example presented in the paper is a doctoral thesis closely related to international cooperation in all stages of research, from setting hypotheses and goals to original scientific contribution relevant to international research. The aim of the presentation is to highlight the importance of international cooperation already in the early phases of PhD studies, as an opportunity for professional and personal advancement within the candidates' own institutions and beyond.

Key words: international cooperation, PhD studies, scientific projects, funds, conferences

**SAŽECI OBRANJENIH
DOKTORSKIH RADOVA
2016. - srpanj 2017.**

**Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju 2016. - srpanj 2017.
(abecednim redom)**

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
2016. godina	
Model predviđanja koncentracije nitrata u podzemnim vodama pod utjecajima iz poljoprivrede dr.sc. Marina Bubalo	135
Razvijajući model planiranja i optimizacije lanca procesa proizvodnje, transporta i ugradnje asfalta dr.sc. Mario Galić	136
Ocjena primjenjivosti nelinearne metode postupnog guranja na niskoj građevini od kamena dr.sc. Dalibor Gelo	137
Ocjena stupnja prigušenja vibracija tramvajskih kolosijeka primjenom metode prolaska tračničkih vozila dr.sc. Ivo Haladin	138
Klasifikacija tla zasnovana na rezultatima statičkog penetracijskog pokusa dr.sc. Lovorka Librić	139
Analiza stabilnosti bočno pridržanih tankostijenih nosača otvorenog poprečnog presjeka dr.sc. Tanja Mališ	140
2017. godina	
Ponašanje posmičnih stijena sa spregnutom ispunom pri djelovanju potresa dr.sc. Ivan Ćurković	141
Numerički model provozne brzine kružnoga raskrižja dr.sc. Sanja Šurdonja	142

dr.sc. Marina Bubalo

Životopis

Rođena je 1986. godine u Slavanskom Brodu. Diplomirala je godine 2005. na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je godine 2016. obranila i disertaciju. Od 2001. godine zaposlena je na Agronomskom fakultetu kao asistentica u Zavodu za melioracije. Suradnica je na predmetima Poljoprivredne melioracije i Izvođenje melioracijskih sustava na preddiplomskom studiju te Hidrotehnika u poljoprivredi, Programiranje i projektiranje sustava navodnjavanja, Korištenje i zaštita voda, Poljoprivredno inženjerstvo, Uređivanje voda i Hydrology and water resources na diplomskom studiju. Sudjelovala je na brojnim znanstvenim i stručnim usavršavanjima u Hrvatskoj i inozemstvu. Autorica je 16 znanstvenih i 12 stručnih radova. Govori engleski, njemački i španjolski.

Mentori: Prof.dr.sc. **Neven Kuspilić**
 Prof.dr.sc. **Davor Romić**

Datum obrane: 29. 9. 2016.

Naslov doktorskog rada

Model predviđanja koncentracije nitrata u podzemnim vodama pod utjecajima iz poljoprivrede

Sažetak

Polazište je istraživanja utvrđivanje dominantne vanjske utjecaje na koncentraciju nitrata u podzemnim vodama u definiranim nitratno-ranjivim područjima (Varaždinska i Međimurska, Vukovarsko-srijemska i Sisačko-moslavačka županija) u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske. Postavljena su tri cilja istraživanja. Prvi je cilj utvrđivanje trenda u izmjerenim koncentracijama nitrata na 26 postaja unutar definiranih područja primjenom Mann-Kendallovog testa trenda. Na 12 postaja utvrđen je pozitivan trend, a na četirima je i statistički značajan. Drugi je cilj definiranje dominantnih utjecaja na koncentracije nitrata. MLR modelima utvrđeno je da su dominantni utjecaji kategorija korištenja zemljišta i prirodna ranjivost vodonosnika. Treći je cilj izrada karata predviđenih koncentracija nitrata u podzemnim vodama u definiranim područjima. Dobivene karte upućuju na to da se istraživana ranjiva područja mogu podijeliti u tri kategorije: a) ranjivo područje – Varaždinska i Međimurska županija, b) djelomično ranjivo područje – Vukovarsko-srijemska županija i c) neranjivo područje – Sisačko-moslavačka županija. Znanstveni je doprinos doktorskoga rada u definiranju optimalnoga statističkog modela za predviđanje koncentracija nitrata u podzemnim vodama pod utjecajima iz poljoprivrede. Različitim statističkim metodama kvantificiran je utjecaj vanjskih čimbenika na koncentracije nitrata, te se rezultati istraživanja mogu primijeniti u sličnim uvjetima poljoprivredne proizvodnje, što je ujedno i praktični doprinos istraživanja.

dr.sc. Mario Galić

Životopis

Rođen je 1983. godine u Osijeku. Osnovno obrazovanje stekao je u Crikvenici, a srednju Graditeljsku školu završio je godine 2002. u Rijeci. Diplomirao je 2010. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, a disertaciju je obranio 2016. godine na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu. Od 2008. do 2010. godine radio je u projektnom uredu Urbos d. o. o. u Osijeku na mjestu projektanta suradnika. Od prosinca godine 2010. zaposlen je na mjestu asistenta u Zavodu za organizaciju, tehnologiju i menadžment na Građevinskom fakultetu u Osijeku. Objavio je 18 znanstvenih radova te je sudjelovao na domaćim i međunarodnim znanstvenim skupovima. Dobro govori njemački i engleski jezik te se služi talijanskim jezikom. Oženjen je i otac dvoje djece.

Mentor: Prof.dr.sc. **Ivica Završki**

Datum obrane: 13. 7. 2016.

Naslov doktorskog rada

Razvijajući model planiranja i optimizacije lanca procesa proizvodnje, transporta i ugradnje asfalta

Sažetak

Tema doktorskoga rada usmjerena je na rješavanje logističkoga (organizacijskog) problema planiranja i optimizacije lanca procesa proizvodnje, transporta i ugradnje vruće asfaltne mješavine. U radu je napravljen pregled stanja područja istraživanja koja spajaju preporuke za daljnji razvoj matematičkih modela za rješavanje logističkih problema, preporuke za razvoj računalnih simulacijskih modela, trenutačno stanje i trend tehnologije proizvodnje, transporta i ugradnje asfaltnih mješavina te stanje područja u procjeni pouzdanosti postrojenja za proizvodnju asfaltnih mješavina. Model izrađen u doktorskome radu uvažava preporuke ranijih istraživanja i potpuno uklanja nedostatke prijašnjih modela, što je potvrđeno na dvjema studijama slučajeva. Model je dinamičan, prilagodljiv izmjenama kvalitete i dotoka ulaznih parametara te je primjenjiv u svim fazama životnoga ciklusa projekta, što ga čini "razvijajućim modelom". Razvijajući model korisniku nudi skup izvedivih scenarija programa proizvodnje, transporta i ugradnje vruće asfaltne mješavine kao podlogu za kvantitativno potvrđivanje pri konačnom odabiru programa, ali i u slučaju izmjene u odabranom programu tijekom realizacije nudi brzu analizu alternativnoga programa i odnos odabira na cijeli projekt. Kao takav, model pridonosi holističkomu planiranju i optimizaciji lanca procesa proizvodnje, transporta i ugradnje asfaltne mješavine.

dr.sc. Dalibor Gelo

Životopis

Rođen je 1982. godine u Zagrebu. Diplomirao je godine 2004. na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu, na Graditeljskom odjelu. Godine 2008. završio je preddiplomski studij na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojemu je godine 2010. završio i diplomski studij te je 2016. godine obranio i disertaciju. Akademskih godina 2007./2008. i 2008./2009. dobio je Dekanove nagrade. Godine 2010. zaposlio se u d.i.j.o. trgovini d. o. o. te je usporedo radio i na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu, na kojem je od godine 2013. u punom radnom odnosu.

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

Datum obrane: 18. 11. 2016.

Naslov doktorskog rada

Ocjena primjenjivosti nelinearne metode postupnog guranja na niskoj građevini od kamena

Sažetak

Očuvanje građevina iznimne kulturne i povijesne važnosti bilo je glavna motivacija za izradu doktorskog rada. Građevine izgrađene od kamena stvaraju inženjerima značajne probleme pri određivanju njihova ponašanja za statička i dinamička djelovanja. Način izgradnje odnosno karakteristike takvih građevina otežavaju primjenu standardnih numeričkih metoda, kao što je metoda konačnih elemenata (MKE). Pri definiranju rada postavljena su dva cilja: određivanje optimalnoga modela i ocjena primjenjivosti metode postupnoga guranja za građevine izgrađene od kamenih blokova. Rad se sastoji od šest poglavlja. Prvo poglavlje prikazuje pregled dosadašnjih istraživanja, motivaciju i metodologiju. Metodologija odnosno istraživanje svodi se na izradu numeričkih modela pomoću MKE-a i diskretne metode. Određivanje optimalnoga modela definirano je usporedbom odgovora numeričkih modela s eksperimentalnim istraživanjem drugih autora. Numerički su modeli izrađeni pomoću računalnoga programa SAP2000 i LMGC90. Prikazani su numerički modeli, modeli kamenoga ziđa koje je uspoređeno s eksperimentalnim istraživanjem i modeli kupole katedrale Sv. Jakova u Šibeniku na temelju kojih je provedena ocjena primjenjivosti metode postupnoga guranja. Znanstveni je doprinos rada u sveobuhvatnoj analizi izrade diskretnih numeričkih modela građevina izgrađenih od kamenih blokova bez uporabe veziva te njihov odziv za horizontalno dinamičko djelovanje. Također je dana ocjena primjenjivosti metode postupnoga guranja za građevine izgrađene od kamenih blokova bez uporabe veziva.

dr.sc. Ivo Haladin

Životopis

Rođen je 1984. godine u Zagrebu. Godine 2009. diplomirao je na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je 2016. godine obranio i disertaciju. Od 2009. godine zaposlen je na tom fakultetu kao asistent u Zavodu za prometnice. Uključen je u nastavnu, znanstvenu i stručnu djelatnost. Izvodi nastavu u sklopu jednoga kolegija na preddiplomskom i četiriju kolegija na diplomskom studiju. Istraživanja provodi u sklopu četiriju istraživačkih projekata. U koautorstvu je objavio jedan znanstveni rad u časopisu indeksiranome u podatkovnoj bazi Current Contents i jedan znanstveni rad u bazi Science Citation Index – Expanded, četiri znanstvena rada u drugim međunarodnim časopisima, 28 radova u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom, četiri rada u drugim zbornicima skupova te 12 poglavlja u knjigama. Aktivno se služi engleskim, a pasivno njemačkim i talijanskim jezikom.

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

Datum obrane: 26. 2. 2016.

Naslov doktorskog rada

Ocjena stupnja prigušenja vibracija tramvajskih kolosijeka primjenom metode prolaska tračničkih vozila

Sažetak

Za određivanje udjela kolosiječne konstrukcije u ukupnim razinama buke izazvanima prometovanjem tračničkih vozila treba utvrditi stupanj prigušenja vibracija kolosiječne konstrukcije. Rezultati istraživanja u sklopu doktorskoga rada daju detaljan uvid u ponašanje tramvajskih kolosiječnih konstrukcija s gledišta stupnja prigušenja vibracija. Pregledom dosadašnjih istraživanja utvrđena je snažna veza između vibracija u frekventnom spektru od 100 Hz do 5000 Hz i generiranja buke pri prolasku tračničkih vozila. S toga gledišta, kako bi se u urbanim sredinama interveniralo na izvoru buke, stupanj prigušenja vibracija pokazao se kao vrlo značajan parametar kojim se može odrediti vibro-akustičko ponašanje tramvajske kolosiječne konstrukcije. Za provedbu mjerenja odabrane su ispitne dionice različitih tipova kolosiječnih konstrukcija kako bi se stupanj prigušenja odredio na reprezentativnom uzorku tipova kolosiječnih konstrukcija rabljenih u sustavu ZET-a, ali i na drugim sustavima tramvajskih kolosijeka koji se koriste kolosiječnom konstrukcijom na čvrstoj podlozi, s diskretnim osloncima tračnice. Iz provedenih ispitivanja i analiza rezultata može se zaključiti da je uz primjenu metode mjerenja prolaskom tramvajskih vozila uz obradu rezultata analitičkim priračunima i uz primjenu metode iteracije energije moguće pouzdano odrediti stupanj prigušenja vibracija kolosiječne konstrukcije u horizontalnom i vertikalnom smjeru u odnosu na poprečni presjek tračnice.

dr.sc. Lovorka Librić

Životopis

Rođena je 1986. godine u Brežicama u Republici Sloveniji. Srednjoškolsko obrazovanje stekla je u Samoboru. Godine 2005. upisala se na preddiplomski studij građevinarstva na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, a 2008. na diplomski studij, smjer Geotehnika. Diplomirala je 2010. s najvećom pohvalom (summa cum laude) te se zaposlila na tom fakultetu kao stručna suradnica u Zavodu za geotehniku, na kojemu od 2012. radi kao asistentica. Od početka svojega rada aktivno sudjeluje u izvođenju vježbi na preddiplomskom i diplomskom studiju te u sklopu stručnih aktivnosti Zavoda za geotehniku: istražnih radova, izrade elaborata, projektiranja, vještačenja, ekspertnih mišljenja i recenzija. Aktivno se služi engleskim jezikom.

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

Datum obrane: 1. 6. 2016.

Naslov doktorskog rada

Klasifikacija tla zasnovana na rezultatima statičkog penetracijskog pokusa

Sažetak

U doktorskome radu opisan je razvoj postupaka klasifikacije tla na osnovi rezultata statičkoga penetracijskog pokusa, čime bi se standardizirani način klasificiranja tla, pomoću rezultata laboratorijskih ispitivanja na pojedinim dubinama, zamijenio bržim i jeftinijim klasificiranjem tla kontinuirano po dubini. Klasifikacija tla skup je procedura pomoću kojih se velik broj različitih vrsta tla koja se nalaze u prirodi razvrstava u skupine sličnih mehaničkih obilježja i ponašanja pod djelovanjem opterećenja. U radu su detaljno opisane USCS klasifikacija prema američkoj normi ASTM D 2487 i ESCS klasifikacija u kojoj se rabe opis i simboli tla prema europskoj normi EN ISO 14688-1 te je zasnovana na načelima klasifikacije tla prema europskoj normi EN ISO 14688-2. Razvijen je računalni program KLASIF radi lakše prilagodbe građevinskih inženjera novom načinu klasificiranja tla u skladu s europskim smjernicama. Prikazan je razvoj novih korelacija i neuronskih mreža za klasifikaciju tla pomoću rezultata CPT-a. Razvijene su dvije neuronske mreže: netFC za prognozu postotka sitnih čestica i netwllp za prognozu granice tečenja i indeksa plastičnosti. Razvijene korelacije i neuronske mreže preporučene su za daljnju primjenu na cijelom području sjeverne Hrvatske. Verifikacija novih korelacija i razvijenih neuronskih mreža (netFC i netwllp) uspješno je provedena na primjeru klizišta Veliki vrh. Znanstveni je doprinos ovoga istraživanja oblikovanje i definiranje postupaka za klasifikaciju tla na osnovi rezultata statičkoga penetracijskog pokusa.

dr.sc. Tanja Mališ

Životopis

Rođena je 1987. godine u Ptuju u Republici Sloveniji, a djetinjstvo je provela u Krapini. Diplomirala je godine 2010. na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je 2016. obranila i disertaciju. Za vrijeme studiranja dobila je Dekanovu nagradu te nekoliko nagrada za postignuti uspjeh na studiju. Nakon diplomskoga studija radila je na tom fakultetu kao vanjska suradnica na predmetu Otpornost materijala I. Godine 2011. zaposlila se u Ministarstvu graditeljstva i prostornoga uređenja, gdje radi i danas kao stručna savjetnica. Položila je stručni ispit za obavljanje poslova graditeljstva i državni stručni ispit. Objavila je tri znanstvena rada i sudjelovala na dvama međunarodnim znanstvenim skupovima. Služi se engleskim, njemačkim i ruskim jezikom.

Mentor: Prof.dr.sc. **Diana Šimić Penava**

Datum obrane: 31. 5. 2016.

Naslov doktorskog rada

Analiza stabilnosti bočno pridržanih tankostijernih nosača otvorenog poprečnog presjeka

Sažetak

Predmet je istraživanja doktorskoga rada gubitak stabilnosti bočno pridržanih tankostijernih nosača otvorenoga poprečnog presjeka, s naglaskom na centrično tlačno opterećene stupove. U sklopu teorijskih istraživanja razmatran je gubitak stabilnosti aksijalno opterećenih tankostijernih nosača različitih podmodela stupova i različitih bočnih pridržanja. Eksperimentalno su ispitani modeli C-profila i Z-profila, kao nepridržani stupovi i kao stupovi bočno pridržani trapezno profiliranim limom. Napravljen je analitički proračun svih modela s prethodno razmatranim različitim bočnim pridržanjima, dimenzija jednakih onima eksperimentalno ispitanim, s naglaskom na proračun eksperimentalno ispitanih modela. Proveden je numerički proračun eksperimentalno ispitanih modela metodom konačnih elemenata. Gubitak stabilnosti aksijalno opterećenih štapova C-profila i Z-profila sveo se na globalni gubitak stabilnosti u različitim oblicima. Usporedbom rezultata istraživanja dokazan je značajan utjecaj bočnoga pridržanja na stabilnost aksijalno opterećenih tankostijernih nosača otvorenoga poprečnoga presjeka te su predložene smjernice vezane uz norme relevantne za predmetno područje. Znanstveni je doprinos rada u detaljnom određivanju utjecaja bočnoga pridržanja na stabilnost aksijalno opterećenih tankostijernih nosača otvorenoga poprečnoga presjeka metodom sinteze analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih istraživanja te u optimalizaciji uporabe tankostijernih nosača otvorenoga poprečnoga presjeka u praksi primjenom odgovarajućega bočnoga pridržanja predloženim smjernicama za dopunu postojeće regulative.

dr.sc. Ivan Ćurković

Životopis

Rođen je 1984. godine u Zagrebu. Diplomirao je godine 2008. na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je godine 2017. obranio i disertaciju. Od 2009. godine radi kao asistent – znanstveni novak na Katedri za metalne konstrukcije matičnoga fakulteta. Godine 2012. dobio je stipendiju Fulbright te je godinu dana boravio na Sveučilištu Northeastern u Bostonu u SAD-u kao gostujući istraživač, gdje mu je mentor bio prof. Hajjar. Objavio je pet znanstvenih radova te sudjelovao na konferencijama u zemlji i inozemstvu. Sudjeluje u stručnim poslovima Zavoda za konstrukcije matičnoga fakulteta. Govori engleski i njemački jezik, a pasivno se služi i talijanskim jezikom.

Mentor: Izv.prof.dr.sc. **Davor Skejić**

Datum obrane: 16. 2. 2017.

Naslov doktorskog rada

Ponašanje posmičnih stijena sa spregnutom ispunom pri djelovanju potresa

Sažetak

Zbog postojećih spoznaja vezanih uz zajedničko djelovanje čelika i betona, pored tradicionalnih se načina izvedbe vertikalne stabilizacije razvijaju sustavi posmičnih stijena koji se sastoje od okvira i spregnute ispune. Takvi sustavi imaju bolja konstrukcijska svojstva uz istodobnu ekonomsku isplativost zbog manjih pojava oštećenja uslijed potresnoga djelovanja. Zbog nedostatnoga uvida u njihovo ponašanje, smjernice su za projektiranje izrazito ograničene ili su pak preuzete za sustave posmičnih stijena s čeličnom ispunom. Takav je slučaj i sa zahtjevima za krutost stupova na savijanje. Budući da se kod sustava posmičnih stijena pretpostavlja mehanizam prijenosa opterećenja korištenjem posmične otpornosti ploče, postoji utemeljena sumnja da je takav uvjet odviše strog. U radu je provedeno eksperimentalno istraživanje kojim se ustanovilo stvarno ponašanje jednokatnih sustava posmičnih stijena s čeličnom i spregnutom ispunom u ovisnosti o različitim krutostima stupova na savijanje. Dobiveni su rezultati poslužili kao podloga za kalibraciju numeričkih modela. Uporabom kalibriranih modela provedene su numeričke parametarske analize kojima je istražen utjecaj krutosti stupova na savijanje, kao i kvalitete čeličnoga materijala ploče ispune za različite geometrijske konfiguracije, tj. omjere L/H. Na temelju dobivenih rezultata predloženo je ublažavanje trenutačno važećega kriterija krutosti stupova na savijanje za jednokatne sustave, a dodatno je u navedeni kriterij uvedena i ovisnost o kvaliteti čeličnoga materijala ploče ispune.

dr.sc. Sanja Šurdonja

Životopis

Rođena je 1979. godine u Sarajevu u Bosni i Hercegovini. Nakon završene srednje škole, godine 1997. upisala se na Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Diplomirala je 2003. godine završivši sveučilišni diplomski studij, usmjerenje Prometnice, te stekla zvanje diplomirane inženjerke građevinarstva. Godine 2006. upisala se na poslijediplomski znanstveni studij na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojemu je godine 2017. obranila disertaciju. Od 2004. do 2017. godine radila je kao asistentica na Građevinskom fakultetu u Rijeci. U nastavi sudjeluje u održavanju vježbâ iz kolegija na preddiplomskom i diplomskom te na specijalističkom diplomskom stručnom studiju. Od 2004. godine do danas sudjelovala je u razvoju niza stručnih aktivnosti na području projektiranja cestovne infrastrukture te objavila više od 25 radova u koautorstvu.

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

Datum obrane: 25. 5. 2017.

Naslov doktorskog rada

Numerički model provozne brzine kružnoga raskrižja

Sažetak

Postupak je projektiranja kružnoga raskrižja u nacionalnim smjernicama iteracijski, te uključuje osiguranje provoznosti, preglednosti i provozne brzine. Provjera provozne brzine u analiziranim smjernicama provodi se dvama modelima za proračun provozne brzine: američkim i nizozemskim. Ispitivanje brzina na uzorku kružnih raskrižja sustavom brojača prometa upozorio je na nedovoljnu pouzdanost navedenih modela u procjeni provozne brzine, a u slučajevima odstupanja od odabira oblikovnih elemenata kružnih raskrižja preporučenih regulativom i na neprimjenjivost. Nastavak ispitivanja provoznih brzina na odabranim kružnim raskrižjima proveden je primjenom osobnoga vozila s Globalnim navigacijskim satelitskim sustavom (GNSS). Ispitivanja su uključivala minimalno 50 prolaza za svaki mjerodavni smjer. Za svaki prolaz određene su provozne brzine na pet pozicija te geometrijski elementi na terenu, opisane su putanje vozila, sveukupno 771 prolaz vozilom. Numerički model za proračun provoznih brzina i radijusa izrađen je za ravnu putanju vozila koja se ispitivanjima pokazala mjerodavnom. Statistički utvrđene razlike između brzina na ulazu, u sredini i izlazu upozorile su na potrebu razvoja zasebnih modela za proračun brzina na navedenim pozicijama, a sama validacija potvrdila je visoku pouzdanost razvijenih modela za proračun brzine u sredini i na izlazu te modela za proračun radijusa putanje u sredini, te slabiju pouzdanost za model za proračun brzine na ulazu u raskrižje. U usporedbi s postojećim modelima postignuta je veća pouzdanost primjene modela razvijenih u ovom radu.

ISBN 978-953-8168-18-5

