

ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

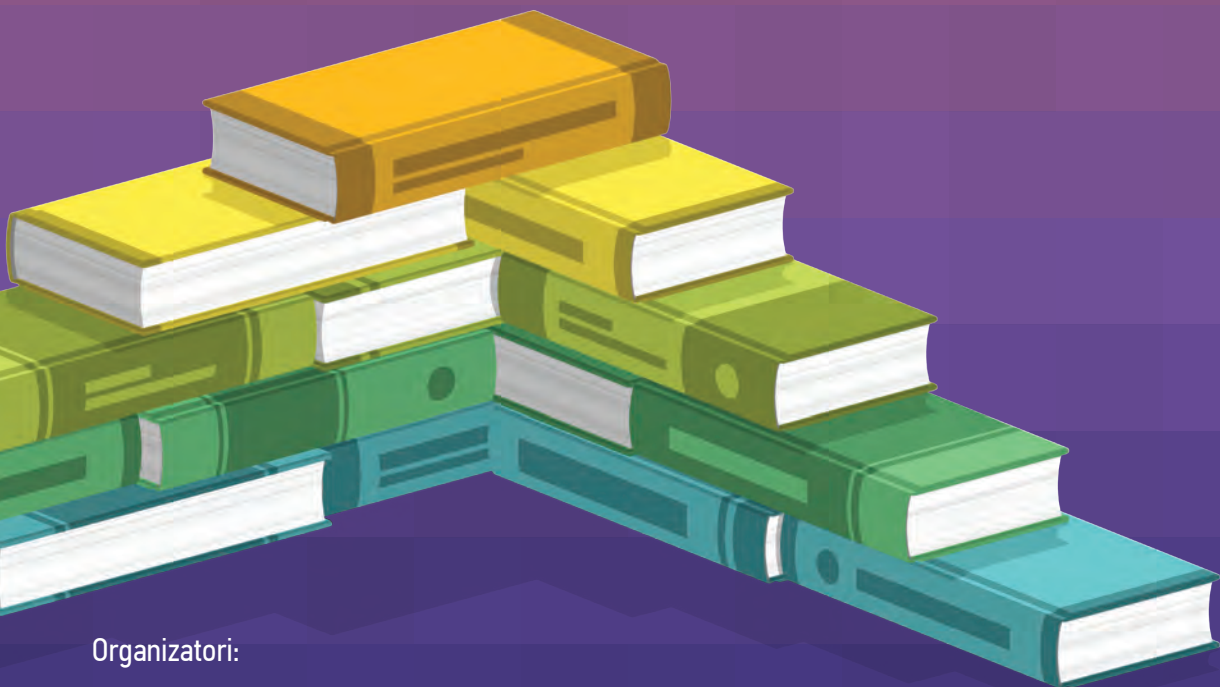
Peti skup mladih istraživača
iz područja građevinarstva
i srodnih tehničkih znanosti

Zagreb, 18.-19. rujna 2017.

Zbornik radova

Urednici:

Gordon Gilja · Ivo Haladin · Ivan Lukačević



Organizatori:



UDRUGA
HRVATSKIH
GRAĐEVINSKIH
FAKULTETA



SVEUČILIŠTE
U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI
FAKULTET

ZG ST RI OS MO

Izdavač

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
Zagreb, Kačićeva 26

Urednici

Dr.sc. Gordon Gilja, dipl.ing.građ.
Dr.sc. Ivo Haladin, dipl.ing.građ.
Dr.sc. Ivan Lukačević, dipl.ing.građ.

Dizajn naslovnice

minimum d.o.o.

Prijelom

Tanja Vrančić

Lektura

Mr. sc. Smiljka Janaček-Kučinić (hrvatski)
Prof.dr.sc. Krešimir Fresl (hrvatski)
Zoran Vulelija (engleski)

Tisak

Tiskara Zelina d.d., 2017.

Naklada

150 kom.

ISBN 978-953-8168-19-2

DOI: 10.5592/CO/ZT.2017

Zagreb, rujan 2017.

CIP zapis

je dostupan u računalnome katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 000972748.

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

Udruga hrvatskih građevinskih fakulteta

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

ZAJEDNIČKI TEMELJI '17

18.-19. rujna 2017., Zagreb

Zbornik radova

Urednici

Gordon Gilja

Ivo Haladin

Ivan Lukačević

Organizacijski odbor skupa

Dr. sc. Gordon Gilja

Dr. sc. Ivo Haladin

Dr. sc. Ivan Lukačević

Dr. sc. Mislav Stepinac

Damjan Bujak

Marijan Car

Janko Koščak

Matej Mihić

Martina Pezer

Dominik Skokandić

Katarina Vranešić

Sve aktivnosti vezane za organizaciju skupa odvijaju se pod okriljem Odbora za znanost Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Predgovor

Razmjena iskustava mladim je znanstvenicima u području građevinarstva jedan od najvažnijih elemenata istraživačkog rada. Ona je osobito važna u početnim stadijima kada se razmatraju ideje, razrađuju pristupi istraživanju i oblikuje put ka konačnom cilju, znanstvenoj izvrsnosti. Pri provedbi istraživanja mladi znanstvenici imaju potrebu za predstavljanjem svojih rezultata i povezivanja s drugim kolegama iz istoga i srodnih znanstvenih područja, kako bi njihov rad i uloženi trud postigao maksimalan odjek unutar znanstvene zajednice. Upoznavanje s drugim istraživačima i njihovim istraživanjima omogućava razmjenu ideja i koncepcija te omogućava razvijanje vlastitoga istraživanja na temelju dobronamjernih kritika i sugestija svojih kolega.

Godišnji skup mladih znanstvenika iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti u organizaciji Udruge hrvatskih građevinskih fakulteta, *Zajednički temelji*, redoviti je skup kojem je cilj poticati upoznavanje mladih znanstvenika s različitim fakulteta i ostvarivanje suradnje kako na znanstvenom polju tako i u ostalim aspektima njihova profesionalnog života. Održavanje skupa u skladu je s mnogim ciljevima Udruge koji se odnose na poticanje znanstvenoga i istraživačkog rada, osiguranje kvalitete istraživanja i obrazovanja, razmjenu informacija i iskustava, poticanje, promicanje i sudjelovanje u razvoju struke i akademske zajednice te na pomoć mladima u razvoju njihovih znanja. Ove godine Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu ponosno nastavlja petogodišnju tradiciju održavanja skupa *Zajednički temelji*, započetu u rujnu 2013. godine s Fakultetom građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu kao domaćinom. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci ugostio je skup 2014. godine te nastavio započetu inicijativu poticanja mladih istraživača na međusobnu suradnju u znanstveno-istraživačkom radu. U međuvremenu je skup nadišao i granice Republike Hrvatske: godine 2015. ulogu organizatora preuzeo je Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, koji je također član Udruge. Godine 2016. skup je održan u novoj zgradi Građevinskoga fakulteta Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, gdje je dogovoreno da se ovaj, peti skup održi u Zagrebu.

Skup *Zajednički temelji 2017.* koncipiran je tako da sudionici prezentiraju svoja istraživanja pred kolegama, a da se njihovi radovi objave u zborniku radova. Uz prezentacije radova, koje su centralni dio skupa, organizirani su i prateći događaji: pozvana predavanja, okrugli stol na temu mobilnosti za vrijeme doktorskih studija, obilazak laboratorija fakulteta i razgledavanje Zagreba. Važno je napomenuti da na skupu od samih početaka osim mladih znanstvenika s fakulteta članova udruge kao pozvani gosti sudjeluju i kolege istraživači sa srodnih fakulteta i tvrtki iz Hrvatske, Irske, Makedonije, SAD-a, Slovenije i Srbije. Javna prezentacija i diskusija pružaju mladim znanstvenicima dodatne smjernice za odabir odgovarajuće metodologije za provedbu istraživanja. Na temelju međunarodnih iskustava sudionika koji su studirali ili provodili istraživanja na nekom od inozemnih sveučilišta izgrađena je ideja za organiziranje okrugloga stola na temu mobilnosti za vrijeme doktorskih studija, koja je zanimljiva i korisna mladim znanstvenicima kako bi prepoznali i usvojili primjere dobre prakse s ostalih sveučilišta.

Posebno nas veseli veliki odziv mladih znanstvenika koji su odlučili aktivno sudjelovati na skupu pripremvši rad na temu vlastitog istraživanja. Za skup *Zajednički temelji 2017.* recenzirana su i u zborniku objavljena 33 rada. Važno je istaknuti da su na ovogodišnjem skupu po prvi puta objavljeni cjeloviti radovi. Također, svi su radovi prošli sustav recenzija koje su proveli mladi doktori znanosti, djelatnici fakulteta okupljenih u Udrugu. Na taj su se način sudionici, neki možda i po prvi put, susreli sa sustavom recenzije radova kakvu mogu očekivati prilikom objavljivanja radova na međunarodnim skupovima i u znanstvenim časopisima. Recenzija je dakako rezultirala i većom kvalitetom sadržaja radova. Osim postupka recenzije radova, svakom je radu u zborniku, također po prvi put na skupu *Zajednički temelji*, dodijeljen i DOI (eng. *Digital Object Identifier*) broj koji jednoznačno identificira publikaciju i objavljeni rad te jamči postojanu internetsku lokaciju na kojoj se rad nalazi, njegovu dostupnost i pretraživost u svakom trenutku te točnost metapodataka. Svaki rad ima dvojezični naslov, sažetak i ključne riječi, što će se, vjerujemo, pozitivno odraziti na povećanje vidljivosti predstavljenih istraživanja mladih znanstvenika. Zbornik radova *Zajednički temelji 2017.* obuhvaća radove iz širokoga područja građevinarstva i srodnih struka koji su svrstani u poglavlja: Upravljanje projektima i zakonska regulativa; Prometnice; Hidrotehnika; Primijenjena matematika; Materijali; Betonske i zidane konstrukcije; Geotehnika; Čelične konstrukcije; Potresno inženjerstvo; Arhitektura; Mobilnost za vrijeme doktorskih studija.

Zbornik skupa *Zajednički temelji* priređen je zahvaljujući velikom trudu svih autora, recenzenata, članova organizacijskoga odbora skupa, ostalih suradnika i urednika. U ime Organizacijskog odbora također zahvaljujemo svima koji su doprinijeli uspješnoj organizaciji skupa, od kojih ističemo Građevinski fakultet kao domaćina, Udrugu hrvatskih građevinskih fakulteta kao suorganizatora, te časopis *Građevinar* kao medijskog pokrovitelja. Posebno bismo istaknuli veliki trud Prodekana za znanost Građevinskog fakulteta prof.dr.sc. Stjepana Lakušića, koji je svojim velikim iskustvom dao izniman doprinos organizaciji skupa *Zajednički temelji 2017.*

Zagreb, 12. rujna 2017.

Urednici

Gordon Gilja

Ivo Haladin

Ivan Lukačević

Sadržaj

Predgovor	5
-----------------	---

Upravljanje projektima i zakonska regulativa

Primjena S-krivulje u građevinskim projektima Ksenija Tijanić, Diana Car-Pušić	13
---	----

Pregled i analiza zakonske regulative u području toplinske zaštite u zgradarstvu Mihaela Teni, Zlata Dolaček-Alduk	21
---	----

Međunarodni standardi za upravljanje projektima - studija slučaja projekta Zagrebačka obala Kristijan Robert Prebanić	29
--	----

Prometnice

Razina usluge na dvotračnim izvangradskim cestama Boris Čutura	39
---	----

Smanjivanje djelovanja lutajućih struja na kolosiječne konstrukcije Katarina Vranešić, Stjepan Lakušić	47
---	----

Primjena računalnih simulacija pri geometrijskom oblikovanju cestovnih raskrižja Šime Bezina	55
---	----

Hidrotehnika

The impact of tree root systems on wastewater pipes Dino Obradović	65
---	----

Kalibracija modela nadziranog učenja optimizacijom modelskih parametara Jadran Berbić, Eva Ocvirk, Dijana Oskoruš, Tatjana Vujnović	73
--	----

Eksperimentalno i numeričko modeliranje tečenja u krškim vodonosnicima Luka Malenica, Hrvoje Gotovac, Grgo Kamber	81
--	----

Hidrodinamički model strujanja vodonosnika "Bokanjac – Poličnik" - kalibracija Željko Šreng, Goran Lončar	89
--	----

Primjena Stimela okruženja na izvorištu Radobolja u Mostaru Tatjana Džeba	97
--	----

Procjena nosivog kapaciteta vodnih resursa primjenom analize neodređenosti i osjetljivosti Marin Kuspilić	103
--	-----

Procjena statističkih parametara koncentracije nutrijenata generiranih rijekama u priobalju Morena Galešić, Roko Andričević, Vladimir Divić	111
--	-----

Primijenjena matematika

Rješavanje SPRP multirezolucijskim postupkom uz primjenu trostruke baze ABF Nives Brajčić Kurbaša, Blaž Gotovac	121
--	-----

Konstrukcija maksimalno balansirane povezane particije u grafu Anton Vrdoljak	129
--	-----

Materijali

Tkaninom armirani mortovi (TRM) kao tehnika pojačavanja AB konstrukcija Martina Carić	139
Pregled modela vremenski ovisnog ponašanja betona Ante Džolan	147
Primjena pepela iz drvne biomase kao zamjena cementa u betonu Ivana Carević, Nina Štirmer, Ivana Banjad Pečur	155

Betonske i zidane konstrukcije

Effect of reinforcement on the fibre orientation within fibre reinforced concrete Marta Miletić, François Guillard, Benjy Marks	165
Ocjena rešetkastoga modela sa slobodnim odabirom nagiba tlačnih štapova primjenom modificirane teorije tlačnog polja Hrvoje Vido	171
Numerička analiza betonske grede izložene udarnom opterećenju: utjecaj udarne površine Natalija Bede	179
Laboratorijska ispitivanja zidanih lučnih mostova, uključujući ispitivanje ponašanja veza Mladen Kustura	185

Geotehnika

Vukovarska gimnazija – istražni radovi i opažanja složenog geotehničkog problema Jelena Kaluder, Ivan Damjanović, Krunoslav Minažek	193
--	-----

Čelične konstrukcije

Posebности projektiranja membranskih konstrukcija Elizabeta Šamec, Maja Baniček	203
Procjena životnoga vijeka zbog umora primjenom lokalnog pristupa Hot Spot Boris Fuštar, Ivan Lukačević, Darko Dujmović	211

Potresno inženjerstvo

Methods for determination of centre of stiffness and torsional radius in multi-storey buildings Riste Volčev, Nikola Postolov	221
Promjene dinamičkih svojstava armiranobetonskoga okvira ispitanog na potresnom stolu Adriana Cerovečki, Ivan Kraus	229
Modeliranje međudjelovanja ljuskastih konstrukcija i tekućine kombinacijom metode konačnih elemenata i čestične metode Marina Sunara Kusić	237

Arhitektura

Korisničko vrednovanje prostornih karakteristika stana Ivana Brkanić, Jelena Atanacković-Jeličić, Radivoje Dinulović	247
Stambene politike i primjeri socijalnog stanovanja u Europskoj uniji Marinko Sladoljev	255

Utopije današnjice - “climate-friendly” gradovi Anja Milovanović, Nada Kurtović-Folić, Olivera Lekić	265
Odnos integracijske jezgre i povijesnih slojeva – upotreba sintakse prostora u planerskim usporedbama gradova Tamara Zaninović, Bojana Bojanić Obad Ščitaroci	273
Mobilnost za vrijeme doktorskih studija	
Engineering doctoral study in Irish Universities: A personal perspective Paul Cahill	283



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

**Upravljanje projektima
i zakonska regulativa**

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.05>

Primjena S-krivulje u građevinskim projektima

Ksenija Tijanić, Diana Car-Pučić

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet

kontakt: ksenija.tijanic@uniri.hr

Sažetak

Radom je prikazana S-krivulja te njena uporaba unutar građevinskih projekata. S-krivulja predstavlja grafički prikaz kumulativnog rasta određenog resursa (troškovi, broj radnika, količina proizvoda itd.) u vremenu trajanja projekta. Unutar građevinskih projekata koristi se kao grafički alat upravljanja projektima. Najčešća je primjena S-krivulje koja prikazuje odnos troškovi-vrijeme. Usporedbama, praćenjem i kontrolom S-krivulja uočavaju se odstupanja od planiranih vrijednosti te voditelj projekta može na vrijeme reagirati i poduzeti određene korektivne mjere kako bi se projekt vratio u planirani okvir, odnosno kako bi se ostvarili ciljevi projekta. Rad definira S-krivulju te prikazuje njenu osnovnu uporabu u građevinarstvu, kako bi se dao pregled dijela teorijske podloge za buduća istraživanja vezana za njeno modeliranje.

Ključne riječi: S-krivulja, upravljanje projektom, kontrola, EVA

Use of S-curve in construction projects

Abstract

The S-curve and its use in construction projects are presented in the paper. This curve is a graphical representation of cumulative growth of a particular resource (costs, number of employees, product quantity, etc.) during realisation of a project. It is used on construction projects as a graphical project management tool. The most common use of the S-curve is for showing the cost-time relationship. Deviations from the planned values are observed through comparison, monitoring and control of the S-curve fluctuations, which enables timely reaction of project manager and the conduct of appropriate corrective measures to bring the project back on the right track, in order to achieve project goals. The paper defines the S-curve and shows its basic use in civil engineering, the aim being to provide an overview of theoretical background that can be used in future research related to S-curve modelling.

Keywords: S-curve, project management, control, EVA

1 Uvod

Cilj je ovog rada predstaviti S-krivulju te način na koji se primjenjuje u građevinarstvu pri upravljanju projektima. Rad daje pregled dijela teorijske podloge za buduće istraživanje vezano za modeliranje toka novca u projektu. Buduće istraživanje želi se usmjeriti na stvaranje modela predviđanja toka novca u projektu, te ispitati u kojoj mjeri se model mijenja ovisno o raznim atributima (parametrima) građevinskog projekta kao što su: model nabave, veličina troškova, trajanje gradnje, vrsta ugovora o građenju, namjena objekta, lokacija, tehnologija izvođenja i sl. Očekivani rezultat istraživanja se bazira na stvaranju karakterističnih troškovnih krivulja ovisno o zadanim atributima građevinskog projekta.

Građevinski projekt je složeni, razvijajući proces koji treba pažljivo pripremiti, planirati, a kasnije i pratiti te kontrolirati kako bi se realizirao unutar planiranih troškova i vremena uz zadovoljenje kvalitete izvedbe. Prilikom provedbe projekta potrebno je koristiti pouzdane alate upravljanja projektima koji će pomoći da se navedeni ciljevi i ostvare. Upravljanje projektom predstavlja primjenu metoda, alata, vještina i tehnika na projektne aktivnosti radi ostvarenja ciljeva projekta [1]. Alat koji se u svrhe upravljanja projektima najradije primjenjuje jest S-krivulja. S-krivulja predstavlja jednostavan i lako razumljiv grafički prikaz koji povezuje kumulativne vrijednosti resursa s vremenom trajanja projekta, a omogućuje praćenje stanja i napredovanja projekta.

2 Definicija S-krivulje

S-krivulja se može definirati kao graf kumulativnog tijeka određenog resursa (troškovi, broj radnika, količina proizvoda...) u određenom razdoblju, pri čemu je na apscisi prikazano vrijeme, a na ordinati količina resursa koji se promatra. S-krivulja se koristi diljem svijeta za istraživanja u projekciji izvedbe tehnologija, predviđanju promjena broja stanovništva, analizi tržišta, za mikro i makroekonomske studije, za ekološko modeliranje, te za mnoge druge svrhe [2]. Unutar građevinarstva se najčešće koristi kao alat upravljanja projektima, prilikom upravljanja troškovima za grafički prikaz izvedbe projekta. S-krivulje obično izrađuje projektni planer ili troškovni inženjer i mogu se primijeniti na različite tipove građevinskih projekata [3].

Zapisi o primjeni S-krivulje datiraju još iz 1928. godine [4], a naziv krivulje proizlazi iz sličnosti sa slovom S. Krivulja je najčešće S oblika jer je priroda građevinskih projekata takva da se u ranijim i kasnijim fazama projekta obavlja manje posla i akumulira manje resursa negoli u srednjim fazama projekta [5]. Iako je S oblik uobičajen, ne treba se iznenaditi ako krivulja projekta ponekad nije S oblika, što će varirati od projekta do projekta, npr. krivulje nekih projekata mogu početi s velikim nagibom i onda se poravnavati, što upućuje na takozvani prednji utovar, a može se dogoditi kod projekata gdje je malo ili nimalo vremena za planiranje, kod popravaka oštećenja, ili bi moglo

upućivati na plan koji je ubrzan na početku. Krivulje koje počinju s nižim usponom, a zatim idu strmo do završetka, mogu upućivati na duže planiranje u početku i kraće vrijeme gradnje [3].

Istraživanja na temu S-krivulja i njenog modeliranja brojna su te se može navesti čitav niz autora koji su istraživali njihovu primjenu u građevinskim projektima. Ovdje će se spomenuti značajni. Boussabain je analizirao tok novca u projektima. Miskawi je razvio jednadžbu S-krivulje za kontrolu projekata. Radujković i Izetbegović su izučavali izbor funkcionalnih veza kod istraživanja trenda S-krivulje [6]. Cioffi se bavio parametrizacijom S-krivulje [7], a također je predložio S-krivulju za analiziranje napretka i troškova projekta koja se može definirati s dvije osnovne vrijednosti parametara, te zaključio kako krivulje s povoljnom ocjenom prilagodbe mogu biti inkorporirane u menadžment ostvarene vrijednosti (eng. *earned value*) [8]. Proučavanjem standardiziranih krivulja bavili su se Balkau, Bromilow, Drake, Hudson, Tucker i Rahilly, Singh i Phua, Kenley i Wilson, Kaka i Price, a prema njima je Ostojić-Škomrlj razvila model za prognoziranje S-krivulja u ranim fazama građevinskih projekata [9].

2.1 Vrste S-krivulje

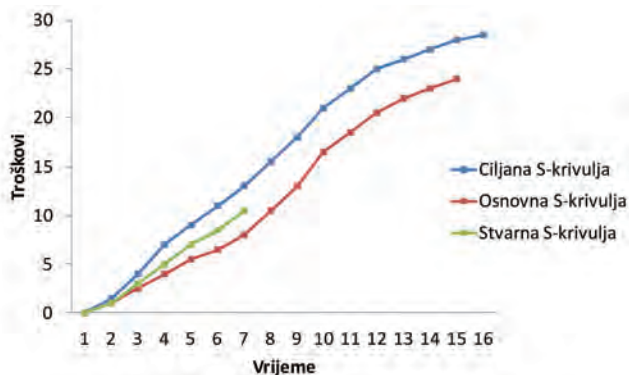
Postoji mnogo vrsta S-krivulja, a najuobičajeniji odnos u građevinskim projektima jest troškovi–vrijeme koji se može primijeniti za planiranje toka novca u projektu, praćenje, kontrolu troškova te napredovanje izvršenja. Unutar projekta se razlikuju osnovna, ciljana i stvarna S-krivulja.

Prije negoli projekt započne, vremenski plan predstavlja predloženu raspodjelu resursa i vremena potrebnog za izvršenje projekta. Taj vremenski plan se naziva osnovni plan te se na temelju njega konstruira osnovna S-krivulja (eng. *baseline S-curve*) koja predstavlja planirani napredak projekta.

Nakon početka projekta obično je potrebna modifikacija osnovnog vremenskog plana. Promjene se kontinuirano unose u plan te takav plan odražava stvarni napredak projekta do točke promatranja. Iz tog plana se konstruira ciljana S-krivulja (eng. *target S-curve*). U dobro vođenim projektima S-krivulja će se poklopiti s osnovnom S-krivuljom na kraju projekta (na vrijeme, unutar proračuna) ili završiti ispod i lijevo od osnovne S-krivulje (ranije, u okviru proračuna). Ipak, češće ciljana S-krivulja završava iznad i desno od osnovne S-krivulje (kasnije, izvan proračuna).

Tijekom izvođenja radova vremenski raspored se ažurira redovito tijekom trajanja projekta. Ažuriranja uključuju uvid u postotak izvršenosti svake pojedine stavke. Koristeći ove informacije može se konstruirati stvarna S-krivulja (eng. *actual S-curve*) koja odražava stvarni napredak projekta do točke promatranja i može se usporediti s osnovnom i ciljanom S-krivuljom kako bi se utvrdilo kako projekt napreduje. Tijekom projekta stvarna će se S-krivulja prekinuti u datumu promatranja projekta [10].

Osnovna, ciljana i stvarna S-krivulja prikazane su na slika 1.



Slika 1. Vrste S-krivulja

2.2 Konstrukcija S-krivulje

Objasnit će se način konstruiranja toka novca u projektu, odnosno S-krivulje troškovi–vrijeme.

Prije konstruiranja same S-krivulje potrebno je provesti određene postupke planiranja. Za definiranu listu aktivnosti nekog projekta najprije se izrađuje dinamički plan, uobičajeno u obliku gantograma. Po gantogramu se zatim prikazuje kretanje troškova iz troškovnika radova. Troškovi aktivnosti se zbog jednostavnosti linearno dijele kroz trajanje aktivnosti. Krivulja se prikazuje u koordinatnom sustavu gdje se na horizontalnoj osi prikazuje vrijeme, a na vertikalnoj kumulativni troškovi. Kad se konstruira krivulja po točkama, vremenski intervali se nanose na vodoravnu os, a na okomitu pripadajuća kumulativna vrijednost troškova zbrojena od početka do kraja projekta ili trenutka promatranja stanja projekta [11].

Ostale vrste krivulja se konstruiraju na jednak način, raspodjelom i zbrajanjem promatranog resursa.

2.3 S-krivulja i kontrola projekata

S-krivulje su vrlo koristan alat za efikasnu kontrolu projekta i donošenje korektivnih mjera kad se stvarna izvedba razlikuje od planirane. Ipak, u tumačenju S-krivulje treba biti oprezan jer, ako se u obzir ne uzmu odnosi između aktivnosti i razlozi odstupanja, mogu se donijeti pogrešne odluke [4]. S-krivulje se primjenjuju na svim razinama upravljanja projektima kod financijske i vremenske kontrole stanja radova. Posebno su korisne voditeljima projekata i upravama koji žele brzu informaciju o ključnim trendovima u projektu i učincima nekih odluka i mjera na trajanje i troškove projekta.

U projektu se tijekom kontrole troškova i vremena uobičajeno primjenjuju dvije S-krivulje: krivulja za planirano stanje i za stvarno izvršenje plana. Takvim prikazom se dobiva dobra dinamička slika trendova i pouzdan uvid u stanje po pojedinim dijelovi-

ma projekta. Dobivaju se tri važne informacije: gdje se projekt treba nalaziti (planirani troškovi-vrijeme), gdje se nalazi (izvršeni troškovi-vrijeme) i kamo ide (prognozirani troškovi-vrijeme). Prognoza se može napraviti nakon određenog vremena (četvrtina ili trećina) trajanja projekta, kad se uoči geometrija S-krivulje izvršenja te se ona produži do kraja zamišljenom linijom prirodnog nastavka. Na ovaj način je moguće odrediti i konačan rezultat projekta, ali s pretpostavkom nastavka istog načina rada [11]. Ako dolazi do većih odstupanja od planiranog, vizualno se to lako uočava i pravodobno se može reagirati i poduzeti korektivne mjere kao što su: povećanje radne snage, radnih sati, strojeva, uvođenje dviju smjena itd. [12].

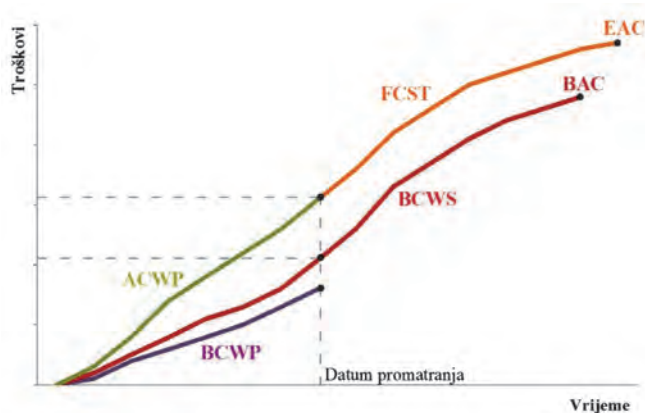
S-krivulja se primjenjuje i za složenije analize praćenja izvršenja projekta kao što je EVA metoda (eng. *Earned Value Analysis*). EVA metoda je metoda mjerenja i kontrole napretka projekta kroz troškove, vrijeme i tehničko/fizičku provedbu definiranog projektnog plana i obuhvata projekta [13]. Pomoću S-krivulje je moguće usporedno prikazivati planirano stanje, trenutačno stanje i prognozu budućeg stanja projekta, te se ona vrlo često koristi za kontrolu troškova pomoću EVA metode kojom se uspoređuje koliki je napredak projekta na temelju stvarnih troškova u trenutku promatranja projekta [14]. Ovaj tip prikaza može biti vrlo učinkovit za brzi uvid u ukupnu izvedbu zadatka, kontrolu računa ili stanja projekta. Omogućuje se prepoznavanje potencijalnog prekoračenja proračuna projekta, prepoznavanje mogućih rizika i pogrešaka koji mogu utjecati na uspješnost projekta.

EVA metoda praćenja troškova zasniva se na tri osnovne varijable (slika 2).

1. BCWS (eng. *Budget Cost of Work Scheduled*) – S-krivulja planirane vrijednosti (troškova) projekta u vremenu. Procjena troškova radi se u fazi planiranja, a na temelju svih projektnih troškova dolazi se do ukupnog proračuna projekta (eng. *Budget at Completion* - BAC) [13].

2. ACWP (eng. *Actual Cost of Work Performed*) – S-krivulja stvarnih troškova za izvršene radove. To su kumulativni stvarni troškovi ostvareni na projektu do točke promatranja. Na temelju ove krivulje od određene točke promatranja mogu se procijeniti troškovi za preostalo vrijeme projekta (eng. *Forecast of Remaining Work* - FCST) te ukupni troškovi na završetku projekta (eng. *Estimate at Completion* - EAC).

3. BCWP (eng. *Budget Cost of Work Performed*) – S-krivulja planiranih troškova za izvršene radove. Izražava se kao količina troškova koja je planirana biti potrošenom na radu dovršenom do točke promatranja [15]. Za izračun BCWP-a za određeni element rada, planirani trošak se pomnoži s postotkom obavljenog rada za promatrani element.



Slika 2. S-krivulje EVA metode

Jednom kad su krivulje za planiranu, stvarnu i ostvarenu vrijednost određene, projektni menadžer ih može koristiti za analizu dosadašnjeg stanja projekta i prognozirati što će se s projektom u budućnosti događati. Uporabom navedene tri S-krivulje dolazi se do varijacija i koeficijenata (troškovna varijacija - CV, vremenska varijacija - SV, indeks troškovnog izvršenja - CPI, indeks izvršenja plana - SPI, procjena vremena na završetku – EACt, procjena troškova na završetku - EAC, varijacija troškova na završetku - VAC, procjena preostalih troškova - ETC) na temelju kojih se može donijeti ocjena dosadašnjeg napredovanja i procjena budućeg stanja projekta. Osim toga, može se uočiti kolika će biti prekoračenja planiranog proračuna i koliko se sredstava mora dodatno osigurati kako bi se projekt mogao dovršiti, ne poduzmu li se određeni koraci koji bi projekt doveli u okvire planiranih novčanih sredstava i planiranog vremena izvedbe.

3 Zaključak

Cilj svakog građevinskog projekta je uspješna realizacija, što podrazumijeva ostvarenje planiranih troškova i planiranog roka građenja uz zadovoljavanje tražene kvalitete. Kao važan alat upravljanja projektima pokazao se kumulativni prikaz resursa tijekom vremena u obliku S-krivulje. S-krivulje omogućuju projektnim menadžerima vizualno praćenje projekta tijekom vremena, identifikaciju kašnjenja u odnosu na planirani početak ili završetak, oblikovanje zapisa onoga što se dogodilo s projektom do određene točke promatranja projekta. S-krivulja se jednostavno primjenjuje, lako je razumljiva te daje brzu informaciju o trendu troškova, vremena i ostalih resursa u projektu. Praćenjem, usporedbom i kontrolom brzo se uočava svako odstupanje od planiranog te se može pravodobno reagirati i poduzeti potrebne korektivne mjere. U budućim istraživanjima toka novca u projektu planiraju se definirati prognostičke

S-krivulje za građevinske projekte različitih karakteristika pomoću kojih će se već u najranijoj fazi moći izvesti simulacija i prognoza kretanja ukupnih troškova gradnje projekta.

Literatura

- [1] PMI: Vodič kroz znanje o upravljanju projektima (Vodič kroz PMBOK), 4. izdanje, Mate d.o.o., 2011.
- [2] Kucharavy, D., De Guio, R.: Application of S-Shaped Curves, TRIZ-Future Conference 2007: Current Scientific and Industrial Reality, ur. Gundlach, C., Lindemann, U., Ried, H., Frankfurt, Njemačka, Kassel University Press, 81 – 88, 2007.
- [3] Goodman, J.: Analyzing S-curves, AACE International Recommended Practice No. 55R-09, 2010.
- [4] Czarnigowska, A., Jaskowski, P., Biruk, S.: Project Performance Reporting and Prediction: Extensions of Earned Value Management, International Journal of Business and Management Studies, 3 (2011), pp. 11 – 20.
- [5] Project management training and resources, <http://www.visitask.com/s-curve.asp>, pristupljeno: 10.07.2017.
- [6] Tijanić, K., Car-Pušić, D., Marović, I.: Managing cost and time in projects of public-use facilities by using the S-curve, People, Buildings and Environment 2016, ur. Korytarova, J., Serrat, C., Hanak, T., Vankova, L., Luhačovice, Republika Češka, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 185 – 196, 2016.
- [7] Cioffi, D.F.: A tool for managing project: an analytic parameterization of the S-curve, International Journal of Project Management, 23 (2005), pp. 215 – 222, doi: 10.1016/j.ijproman.2004.08.001
- [8] Nai-Chieh, W., Chiao-Ping, B., Shuan-Yuan, Y., Pao-Sheng, W.: Earned Value Management Views on improving Performance of Engineering Project Management, The International Journal of Organizational Innovation, 8 (2016), pp. 93 – 111.
- [9] Ostojić-Škomrlj, N., Radujković, M.: Model prognoziranja S-krivulja u ranim fazama građevinskih projekata, Građevinar, 64 (2012), pp. 647 – 654.
- [10] Max's Project Management Wisdom, <http://www.maxwideman.com/guests/s-curve/using.htm>, pristupljeno: 10.07.2017.
- [11] Radujković, M. i suradnici: Planiranje i kontrola projekata, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2012.
- [12] Šonjić, N., Dolaček-Alduk, Z., Habuda-Stanić, M.: Upravljanje projektom izgradnje uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u Kneževim Vinogradima, e-GFOS, 5 (2012), pp. 52 – 63, doi: 10.13167/2012.5.5

- [13] Duspara, A., Katić, D.: Metoda ostvarene vrijednosti, e-Zbornik: Electronic collection of papers of the Faculty of Civil Engineering, 7 (2014), pp. 76 – 86.
- [14] Čulo, K.: Ekonomika investicijskih projekata, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet, 2010.
- [15] Anbari, F.: Earned value project management method and extensions, Project Management Journal, 34 (2003) 4, pp. 12 – 23.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.18>

Pregled i analiza zakonske regulative u području toplinske zaštite u zgradarstvu

Mihaela Teni, Zlata Dolaček-Alduk

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, Osijek
kontakt: mteni@gfos.hr

Sažetak

U radu su prikazane promjene zakonske regulative Hrvatske u području toplinske zaštite u zgradarstvu s ciljem izrade sustavnog prikaza povijesnog razvoja propisa. Pregledom zakonske regulative obuhvaćen je period od donošenja prvog propisa o toplinskoj zaštiti zgrada 1970. godine do danas. Budući da je koeficijent prolaska topline U (W/m^2K) najvažniji čimbenik koji se koristi za opisivanje toplinskih svojstava zgrada, a time i ukupne energetske učinkovitosti neke zgrade, osim pregleda i analize postojećih propisa, grafički su prikazane i promjene najvećih dopuštenih vrijednosti koeficijenta prolaska topline U (W/m^2K) za vanjski zid kao karakteristični građevinski element u ovisnosti o zakonskoj regulativi i karakterističnim razdobljima izgradnje zgrada u Hrvatskoj.

Ključne riječi: zakonska regulativa, toplinska zaštita, energetska učinkovitost, koeficijent prolaska topline

Overview and analysis of legislation in the field of thermal protection of buildings

Abstract

The paper presents developments and changes in Croatian legislation in the field of thermal protection of buildings with the aim of systematic overview of the historical development of regulations. A review of the legal regulations is done for the period from the adoption of the first regulation on thermal protection of buildings in 1970 until today. Since the thermal transmittance coefficient U (W/m^2K) is the most important factor used to describe the thermal properties of buildings, and thus the overall energy efficiency of a building, except for the review and analysis of the existing regulations, changes of maximum permissible values of the heat transfer coefficient U (W/m^2K) for the external wall as a characteristic building element are graphically presented depending on the legal regulation and typical construction period in Croatia.

Keywords: legislation, thermal protection, energy efficiency, thermal transmittance coefficient

1 Uvod

Svijest o ograničenosti prirodnih resursa i potrebi uštede energije počela se u svijetu značajnije razvijati 1970-ih godina kao posljedica velikih naftnih kriza. Energetskom krizom pogođene su mnoge razvijene zemlje te je nametnuta štednja energije u svim sektorima potrošnje. Budući da se značajan dio energije trošio već tada kao i danas na grijanje i klimatizaciju zgrada, kao nužna, nametnuta je primjena optimalne toplinske zaštite. Uočavanje potrebe za toplinskom zaštitom rezultiralo je i donošenjem propisa iz područja toplinske zaštite zgrada u mnogim zemljama. Iako su već pedesetih godina 20. stoljeća u europskim zemljama donesene prve norme kojima se djelomično ograničavala potrošnja energije, pojavom energetske krize norme su inovirane, obuhvaćen je veći opseg parametara te su propisani stroži kriteriji za toplinsku zaštitu zgrada i zaštitu građevinskih pregrada od kondenzacijske vlage [1]. Od energetske krize do danas, zakonska regulativa u području toplinske zaštite u zgradarstvu doživjela je brojne izmjene kako u Hrvatskoj tako i u ostatku svijeta, a sam razvoj propisa, od donošenja prvih propisa do danas, niti je jednostavan niti je isključivo posljedica porasta troškova energije.

Da bi se izradio sustavni pregled propisa u području toplinske zaštite zgrada, u radu je analizirana hrvatska zakonska regulativa od donošenja prvog propisa 1970. godine do danas. Budući da su se usporedno s promjenama propisa mijenjali i traženi zahtjevi za toplinsku zaštitu zgrada te da velik broj postojećih zgrada izgrađenih prije nekoliko desetljeća troši velike količine energije i ne zadovoljava sadašnje propise vezane uz toplinsku zaštitu zgrada, u radu su uz sustavni pregled regulative prikazane i povezane promjene najvećih dopuštenih vrijednosti koeficijenta prolaska topline s obzirom na karakteristična razdoblja izgradnje zgrada u Republici Hrvatskoj.

2 Razvoj propisa u području toplinske zaštite u zgradarstvu

Pravno tehnička regulativa u pogledu uštede energije počinje s primjenom na našem području 1962. godine kada je donesena *Naredba o određivanju građevinskog materijala za koji se mora pribaviti atest ili se mora ispitati*, objavljena u Službenom listu SFRJ br. 15 [2]. Prema Naredbi je u materijale za koje treba pribaviti atest citiran i materijal za toplinsku zaštitu [2]. Pet godina poslije, objavljen je *Pravilnik o minimalnim tehničkim uvjetima za izgradnju stanova* (Službeni list SFRJ br. 45) kojim je prvi put određena minimalna toplinska zaštita objekta. Prema Dančeviću [3], navedeni pravilnik predstavlja kod nas početak detaljnijeg rješavanja i shvaćanja važnosti problematike toplinske zaštite i zaštite od buke prilikom projektiranja zgrada. Međutim, u pogledu toplinske i zvučne zaštite smatra da je vrlo oskudan te da se pridržavajući zahtjevima pravilnika ne može ništa pozitivno učiniti u smislu rješavanja problematike toplinske zaštite i zaštite od buke, ali da i kao takav ipak predstavlja pozitivan napredak u ovome području [3].

Prvi propis o toplinskoj zaštiti donesen je 1970. godine pod nazivom *Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za toplinsku zaštitu zgrada*, Službeni list SFRJ broj 35/70 [4]. Navedeni pravilnik imao je veliku važnost za projektante i druge tehničke kadrove u pogledu rješavanja toplinske udobnosti u prostoru u kojemu borave ljudi u okviru tadašnjeg trenda montažne i polumontažne tehnologije građenja uz primjenu novih materijala. Pravilnikom su određene građevinsko-klimatske zone za područje tadašnje SFRJ sa srednjim vrijednostima najnižih temperatura, minimalna toplinska izolacija zgrada ograničenjem koeficijenata prolaska topline k u $\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (danas U u $\text{W/m}^2\text{K}$), odnosno koeficijenata otpora prolasku topline $1/\lambda$ ($\text{W/m}^2\text{K}$), vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za građevine materijale. Za upotrebu drugih materijala koji nisu definirani u propisu uvjetuje se da su računске vrijednosti toplinske provodljivosti tih materijala potvrđene atestom koji izdaje stručna radna organizacija ovlaštena za ispitivanje toplinske provodljivosti materijala. Deset godina kasnije, 1980. godine, nakon što su svijet pogodile energetske krize i time nametnule potrebu uštede energije u svim sektorima potrošnje, donesena je norma pod nazivom JUS U.J5.600 – *Toplotna tehnika u građevinarstvu - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada* [5]. Ovim propisom napravljen je napredak u području smanjenja toplinskih gubitaka u zgradama smanjenjem dopuštenih vrijednosti koeficijenata prolaska topline građevnih elemenata u prosjeku za 30 %. Revizijom norme iz 1980. godine, doneseno je 1987. godine novo dopunjeno izdanje s pooštrenim zahtjevima u pogledu toplinske zaštite zgrada i obaveznom primjenom od 23. prosinca 1987. [6]. U odnosu na prethodnu normu, racionalna uporaba energije dodatno je osigurana propisivanjem dopuštenih specifičnih transmisijskih toplinskih gubitaka zgrade i toplinskih gubitaka provjetravanjem.

Norma pod oznakom HRN U.J5.600 vrijedila je do 2006. godine. Tada je, zbog zastarjelosti propisa, obveze usklađivanja tehničkog zakonodavstva Republike Hrvatske (države kandidatkinje za članstvo u EU) s tehničkim zakonodavstvom Europske unije te međunarodne obveze iz područja zaštite okoliša (Kyoto protokol) stupio na snagu novi *Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* objavljen u Narodnim novinama broj 79/05 [7]. Donošenje Tehničkog propisa o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti kod zgrada predviđeno je za 2005. godinu u Nacionalnom programu za pridruživanje Europskoj uniji, a odredbama Zakona o gradnji osigurao se i pravni okvir za donošenje toga tehničkog propisa u skladu s potrebama usklađivanja s pravnim naslijeđem Europske unije. Tehničkim propisom zahtjevi su i kriteriji vezani na uštedu energije i toplinsku zaštitu u zgradama dodatno pooštreni. Propisano je održavanje zgrade u odnosu na uštedu toplinske energije i toplinsku zaštitu, iskaznica potrebne topline za grijanje zgrade, ograničena je najveća dopuštena potrošnja toplinske energije te su smanjene dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaska topline građevnih elemenata.

Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 79/05, 155/05, 74/06) zamijenjen je 2008. godine *Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* (NN 110/08) [8]. Novim tehničkim propisom implementirana je Direktiva 2002/91/EC o energetske svojstvima zgrada Europskog parlamenta od 16. prosinca 2002. i Direktiva 89/108/EEC Europskog parlamenta od 22. prosinca 1989. godine. U usporedbi s prethodnim propisom uvedena je obveza izračunavanja potrebne toplinske energije za hlađenje ako se zgrada hladi dok su vrijednosti ograničenja najveće potrebne godišnje topline za grijanje ostale iste. Norma za proračun potrebne toplinske energije za grijanje, HRN EN 832:2000 zamijenjena je stoga normom HRN EN 13790:2008, prema kojoj se, osim potrebne toplinske energije za grijanje, računa i potrebna energija za hlađenje.

Prije stupanja na snagu novog *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* (NN 97/14) objavljene su izmjene *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* (NN 89/09, 79/13, 90/13). Izmjenama je, između ostalog, uvedeno ograničenje primarne energije za nove jednoobiteljske zgrade i veće rekonstrukcije postojećih zgrada u iznosu od 90 kWh/m² godišnje za gradove i mjesta koji imaju manje od 2200 stupanj dana grijanja godišnje, odnosno 160 kWh/m² godišnje za gradove i mjesta koji imaju više ili jednako 2200 stupanj dana grijanja godišnje.

Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 97/14) objavljen je u kolovozu 2014. [9]. Zahtjevi toga propisa za racionalnu upotrebu energije i toplinsku zaštitu u zgradama, u odnosu na prethodni propis, prošireni su te se utvrđuju dodatno najvećom dopuštenom primarnom energijom po jedinici ploštine korisne površine zgrade, najvećim dopuštenim koeficijentima prolaska topline pojedinih građevnih dijelova između grijanih dijelova zgrade različitih korisnika, učinkovitošću tehničkog sustava grijanja, hlađenja, ventilacije, klimatizacije i pripreme potrošne tople vode, najvećom dopuštenom godišnjom potrebnom energijom za rasvjetu zgrade (osim jednoobiteljskih stambenih zgrada i višestambenih zgrada), razredom učinkovitosti sustava automatizacije i upravljanja zgradom te udjelom obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji primarne energije. S obzirom na značajan utjecaj toplinskih mostova na ukupnu potrošnju energije, veliki napredak u području energetske učinkovitosti i toplinske zaštite zgrada predstavlja i novi prilog u kojemu je sadržan katalog s grafičkim prikazima dobro riješenih toplinskih mostova na zgradama. U odnosu na prethodni propis, kojim se započela obveza proračuna godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje, novim propisom dodatno su propisane i vrijednosti najveće dopuštene godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje po jedinici ploštine korisne površine zgrade, najveće dopuštene godišnje potrebne primarne energije ovisno o namjeni, a vrijednosti najveće dopuštene godišnje potrebne toplinske energije za grijanje definirane su s obzirom na namjenu zgrade te su bitno izmijenjene. Najveće dopuštene vrijednosti godišnje potrebne primarne energije ovi-

sno o namjeni definirane su i za rekonstrukciju zgrada. Na osnovi daljnjeg usklađivanja s Direktivom o energetske svojstvima zgrada 2010/31/EU u dijelu koji se odnosi na zgrade približno nulte energije, Tehničkim propisom definirani su rokovi i zahtjevi za projektiranje i gradnju stambenih i nestambenih zgrada približno nulte energije. Najveće dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaska topline građevnih dijelova za područje kontinentalne Hrvatske dodatno su umanjene za 15 do 60 % dok su za područje primorske Hrvatske izmjene koeficijenata znatno manje te su u malom broju slučajeva čak i uvećane u odnosu na prethodni propis.

Sadašnji *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* objavljen je 25. studenoga 2015. godine u "Narodnim novinama" broj 128/2015, a stupio je na snagu 1. siječnja 2016. godine [10]. Tehnički zahtjevi u pogledu racionalne uporabe energije i toplinske zaštite zgrade novim su propisom utvrđeni za nove zgrade, zgrade gotovo nulte energije i postojeće zgrade prilikom rekonstrukcije koje se griju i/ili hlade na temperaturu 18 °C ili više. U Tehničkom propisu, uz ostale uvjete i zahtjeve, propisane su najveće dopuštene vrijednosti godišnje potrebne toplinske energije za grijanje, godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje, godišnje primarne energije i po novom godišnje isporučene energije.

3 Energetsko stanje postojećih zgrada u Hrvatskoj

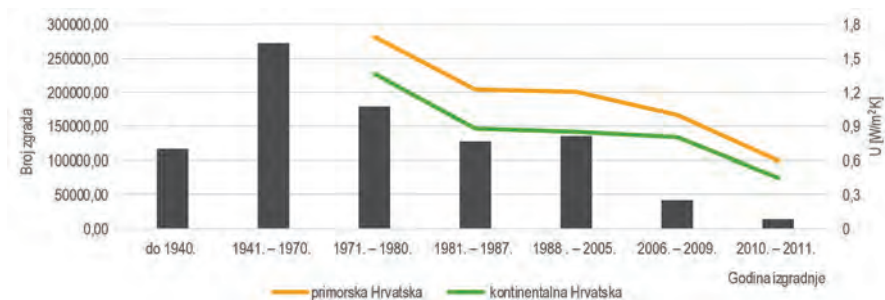
Zgrade izgrađene prije nekoliko desetljeća u Republici Hrvatskoj veliki su potrošači toplinske energije. Opća kvaliteta tih zgrada mijenjala se tijekom različitih razdoblja izgradnje kao posljedica različitih klimatskih, gospodarskih, tehničko-tehnoloških i socioloških utjecaja, a poseban utjecaj na kvalitetu i samim tim potrošnju energije imala je cijena energije potrebna za zagrijavanje i propisi iz područja toplinske zaštite zgrada [11]. Prije donošenja prvog propisa, koji je uređivao područje uštede energije i toplinske zaštite u zgradama, izgrađeno je gotovo 50 % fonda zgrada Republike Hrvatske [12]. Prema procjenama, prosječna potrošnja energije za grijanje prostora navedenih zgrada iznosi oko 200 kWh/m²a [12]. Također, problem postojećih zgrada građenih prije nekoliko desetljeća, prije, ali i nakon donošenja propisa o toplinskoj zaštiti zgrada, jest taj da takve zgrade imaju samo minimalnu toplinsku izolaciju ili je uopće nemaju, imaju značajne toplinske gubitke te ne ispunjavaju sadašnje zahtjeve vezane uz energetske učinkovitost.

4 Usporedba vrijednosti koeficijenta U ovisno o zakonskoj regulativi

Najvažniji čimbenik za opisivanje toplinskih svojstava zgrada i razine toplinske zaštite zgrade, a time i ukupne energetske učinkovitosti neke zgrade jest koeficijent prolaska topline, U (W/m²K). Što je njegova vrijednost manja, to je bolja toplinska izolaci-

ja zgrade [13]. U ovisnosti o zakonskoj regulativi mijenjale su se i propisane najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline za pojedine građevne dijelove. U pravilu, svakim novim propisom postavljeni su stroži kriteriji, odnosno smanjivale su se propisane najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline, čime se povećavala minimalna toplinska zaštita zgrada.

Budući da su vanjski zidovi u prosjeku najveći pojedinačni elementi vanjske ovojnice u zgradi, na slici 1. prikazana je usporedba propisanih najvećih dopuštenih U vrijednosti vanjskih zidova u ovisnosti o zakonskoj regulativi s obzirom na karakteristična razdoblja izgradnje zgrada u Hrvatskoj. Najveće dopuštene U vrijednosti za vanjske zidove definirane su kroz postojeće propise ovisno o klimatskim uvjetima u kojima se zgrada nalazi, temperaturi na koju se zgrada zagrijava te srednjoj mjesečnoj temperaturi vanjskog zraka najhladnijega mjeseca na lokaciji zgrade. S obzirom na to da je u propisima do 2005. godine vrijedila podjela bivše SFRJ na tri građevinsko-klimatske zone te je nakon toga u Republici Hrvatskoj uvedena podjela na dvije zone, kontinentalnu i primorsku Hrvatsku, na slici 1. prikazane su najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline za prvu (primorsku) i srednju vrijednost druge i treće (kontinentalnu) građevinsko klimatske zone do 2005. godine, a nakon toga za propisima definirane dvije klimatske zone – kontinentalnu i primorsku Hrvatsku. Prema slici 1. vidljivo je kako je najveći udio zgrada s lošim toplinskim karakteristikama izgrađen do 2005. godine pri čemu su najveće dopuštene U vrijednosti veće za više od 55 % od onih koje danas vrijede.



Slika 1. Najveće dopuštene U vrijednosti, za vanjski zid ovisno o zakonskoj regulativi prema karakterističnim razdobljima izgradnje zgrada

5 Zaključak

Hrvatsko zakonodavstvo u području toplinske zaštite u zgradarstvu doživjelo je u posljednjih 47 godina (od donošenja prvog propisa do danas) značajne izmjene. Do raspada bivše SFRJ vrijedile su JUS norme, a nakon toga na području Hrvatske i ostalih zemalja započeo je proces usklađivanja regulative s europskim direktivama.

Sustavnim pregledom propisa tijekom godina prikazan je razvoj i navedene su glavne promjene u sadašnjim propisima. Svaka promjena propisa u pravilu je rezultirala strožim zahtjevima u vezi s toplinskom zaštitom, uštedom i racionalnom uporabom energije, a same promjene propisa posljedica su postavljanja sve viših kriterija na ovaj sektor kako bi u skladu s tehnološkim razvojem ukupna potrošnja energije u zgradama bila sve niža. Budući da se golema količina energije troši upravo u sektoru zgradarstva, brojnim promjenama zakonske regulative napravljen je stoga značajan pozitivan napredak u smjeru postizanja cilja smanjenja energetske potrebe, a time i energetskeg razvitka na načelima održivosti.

Literatura

- [1] Građevinska fizika i materijali. Jugoslavensko društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija (JUDIMK), Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2003.
- [2] Tehničar, Građevinski priručnik, Izdavačka radna organizacija, Građevinska knjiga, Beograd, 1984.
- [3] Dančević, D.: Termička i zvučna izolacija u građevinskim objektima, Zajednica zavoda za zaštitu na radu, Niš, 1968.
- [4] Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za toplinsku zaštitu zgrada, Službeni list SFRJ br. 35/70, 1970.
- [5] JUS U.J5.600 – Toplotna tehnika u građevinarstvu - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada, Službeni list SFRJ br. 3/80, 1980.
- [6] JUS U.J5.600 – Toplotna tehnika u građevinarstvu - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada, Službeni list SFRJ 69/87, 1987.
- [7] Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, NN broj 79/05, 2005.
- [8] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, NN broj 110/08, 2008.
- [9] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, NN broj 97/14, 2014.
- [10] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, NN broj 128/15, 2015.

- [11] Koški, Ž., Ištoka, I., Miličević, I.: Klasifikacija elemenata zgrada u funkciji mjerenja zrako-propusnosti, *Građevinar*, 65 (2013) 3, pp. 223-233.
- [12] Dugoročna strategija za poticanje ulaganja u obnovu nacionalnog fonda zgrada Republike Hrvatske, Vlada Republike Hrvatske, 2014.
- [13] Vrančić, T.: Toplinskoizolacijski materijali u graditeljstvu, *Građevinar*, 57 (2005) 10, pp. 829-833.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.26>

Međunarodni standardi za upravljanje projektima - studija slučaja projekta Zagrebačka obala

Kristijan Robert Prebanić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
kontakt: kprebanic@grad.hr

Sažetak

Ovaj rad bavi se analizom istaknutih međunarodnih standarda iz područja upravljanja projektima, ali i mogućnosti primjene tih standarda u upravljanju projektima gradnje u Republici Hrvatskoj. U radu se analiziraju standardi ICB, PMBOK, PRINCE2 i ISO 21500. U drugom dijelu razrađena je studija slučaja projekta Zagrebačka obala na temelju kojih se analizira upravljanje realnim projektima gradnje u Hrvatskoj. Tom studijom slučaja pruža se praktični uvid u stanje upravljanja projektima gradnje naspram deskriptivnog standarda ISO 21500. U studiji analizirani su određeni dionici upravljanja projektima, a također je pružen i uvid u grupe procesa upravljanja projektima te upravljačku strukturu projekta. Naposljetku rezultati ovog istraživanja pokazuju da se u određenim velikim građevinskim projektima u RH prepoznaju standardi i najbolje prakse, ali da se još dovoljno ne primjenjuju. Voditelji projekta su prepoznati i imenovani na velikim građevinskim projektima, no još uvijek ne rade sve funkcije koje propisuju standardi, što je detektirano kao smjer u kojem će se upravljanje građevinskih projekata dalje razvijati.

Ključne riječi: projekti, upravljanje projektima, ISO 21500, norme

International standards in the field of project management - Case study: Zagrebačka obala

Abstract

This paper deals with the renowned international standards in the field of project management and possibilities of application of these standards in construction project management. The work analyzes standards ICB, PMBOK, PRINCE2 and ISO 21500. In the second part case study Zagrebačka obala is presented, which analyzes management of real construction project in Croatia. In this study practical insight in the management of construction projects through ISO 21500 concepts is made. All project management stakeholders were analyzed in the study, and insights were also given to project management processes and the project management structure. Finally, the results of this research have shown that engineering public recognizes standards and best practices, but does not yet use them in a satisfactory manner. Project leaders are recognized and appointed on major construction projects but still do not perform all the standards-prescribed functions, which has been identified as a direction in which the management of construction projects will be further developed.

Keywords: project, project management, ISO 21500, standards

1 Uvod

Upravljanje projektima (UP) možemo definirati kao: "...planiranje, organizacija, monitoring i kontrolu svih aspekata projekta... ...unutar dogovorenog vremena, troškova i kriterija izvršenja." [1]. Glavna pretpostavka te djelatnosti su projekti čije su glavne odrednice privremenost, jednokratnost, ograničenost vremena i resursa i timski rad [1]. Mnoga istraživanja pokazala su da postoje veliki problemi u efikasnosti UP: "Istraživanje Svjetske banke provedeno na približno 1,600 projekata upozorava na 70 postotno prosječno prekoračenje početno planiranog roka kod čak 88 % projekata. Istraživanje provedeno u Hrvatskoj u razdoblju od 1996. do 1998. ukazuje na 60 postotno prekoračenje vremena u fazi građenja kod 78 % od ukupno 333 razmatrana projekta" [2]. Također, važno je navesti podatak da će u razdoblju od 2010. do 2020. svake godine u projekte biti uloženo oko 12 trilijuna USD, odnosno 1/5 svjetskog BDP-a [3]. U današnjem globalno povezanom svijetu prisutna su međunarodna udruženja iz područja UP (IPMA, PMI). Njihovim su se radom, temeljenim na istraživanjima najboljih svjetskih iskustava, razvili određeni standardi UP. Oni su široj zajednici prezentirani u obliku takozvanih knjiga znanja kao najvažnijeg izdanja, iako su i internetske stranice i konferencijski članci izdani u suradnji sa znanstvenim časopisima poslužili kao medij za prijenos najboljih svjetskih iskustava [4]. Istraživanja su pokazala da treba najbolja iskustva iz prakse primjenjivati na realnim projektima jer uvelike doprinose uspjehu projekta [5]. Međutim, na temelju navedenih problema s izvršenjem ciljeva projekata u Hrvatskoj [2] može se zaključiti da se nedovoljno primjenjuju znanja iz međunarodne prakse upravljanja projektima. Sve je to razlog zašto će se analizirati istaknuti standardi, a potom ispitati primjena ISO 21500 standarda na studiji slučaja projekta Zagrebačke obale. Glavni je cilj ovog rada istražiti da li voditelji takvih kompleksnih projekata koji se izvode u RH primjenjuju standarde (najbolje prakse) i na koji se način primjenjuju znanja navedena u standardima.

2 Istaknuti međunarodni standardi upravljanja projektima

U proteklih pedesetak godina osnovana su mnoga nacionalna i internacionalna udruženja iz područja upravljanja projektima i većina je njih tijekom godina razvila svoje standarde upravljanja. U ovom radu analizirat ćemo PMBOK, ICB, PRINCE2 i ISO 21500.

2.1 IPMA ICB

IPMA ICB (Individual Competence Baseline) standard je za upravljanje projektima koji izrađuje i publicira International project management association (IPMA). IPMA ICB 4 je zadnje izdanje općeg standarda koji propisuje individualne kompetencije u uprav-

ljanju projektima, programima i portfeljima [6], za razliku od većine drugih standarda (PMBOK, PRINCE2) koji propisuju procese. Individualne kompetencije su primjena znanja, vještina i sposobnosti u svrhu postizanja željenih ciljeva. Treba napomenuti da ICB 4 propisuje elemente kompetencija, i to njih dvadeset devet smještenih unutar tri područja kompetencija, a u ovom radu promatramo samo domenu projekata.

2.2 PMI PMBOK

Project management Body of knowledge (PMBOK) međunarodno je priznati i prepoznati standard iz UP-a koji se bavi primjenom znanja, vještina, alata i tehnika kako bi zadovoljili zahtjeve projekta, a razvija ga *Project Management Institute* (PMI) najveća svjetska neprofitna organizacija (SAD) 1969. iz područja upravljanja projektima. PMBOK je procesni standard te se u njemu navodi da se proces sastoji od ulaza, tehnika i alata koje možemo primijeniti, i izlaza. Napomenute tehnike i alati u sljedećim poglavljima razjašnjeni su za svaki proces, što PMBOK čini jednim od rijetkih standarda koji daje odgovor na pitanje kako nešto napraviti. Definirano je pet temeljnih skupina procesa: *Početni (inicijalni) procesi*, *Procesi planiranja*, *Izvršni procesi*, *Kontrolni procesi*, *Završni procesi*, a unutar tih pet skupina nalazi se četrdeset procesa za upravljanje projektima.

2.3 PRINCE2

Projects in controlled environment (PRINCE2) je metoda za učinkovito upravljanje projektima temeljena na procesima. Od 2013. godine vlasnička prava, odnosno prava na licenciju i razvoj PRINCE2 standarda prebačeni su na AXELOS Ltd., koji je zajednička organizacija Vlade UK i poduzeća Capita [9]. PRINCE2 standard sastoji se od četiri integrirana elementa, a to su principi, teme, procesi i projektno okruženje [10]. Postoji sedam principa, sedam tema i sedam procesa, a svaki od njih stavljen je u kontekst životnog ciklusa projekta što ukazuje na to da je ovaj standard zamišljen i napisan kao metodologija.

2.4 ISO 21500

ISO 21500 je standard za upravljanje projektima koji je publicirala u studenom 2012. International Organization for Standardization, a predstavlja zajednički referentni okvir i procesni standard, odnosno smjernicu zamišljenu kao krovni standard nad svim standardima i konceptima upravljanja projektima. Sam standard razrađuje 10 koncepta: *Projekt*, *Upravljanje projektima*, *Organizacijska strategija i projekti*, *Projektno okruženje*, *(Vlasničko) upravljanje projektima*, *Projekti i operacije*, *Dionici i projektna organizacija*, *Kompetencije zaposlenika u projektu*, *Životni vijek projekta*, *Projektna ograničenja*.

2.5 Odabir standarda za ispitivanje za studiju slučaja

Standardi su uspoređeni prema organizacijama koje ga promiču i prema određenim kriterijima koji prikazuju bitne stavke svake od organizacija u smislu veličine i raširenosti u svijetu, tablica 1.

Tablica 1. Usporedba organizacija kreatora standarda za UP

Kriterij usporedbe	Vlasnik standarda			
	IPMA	PMI	AXELOS	ISO 21500
Temeljna djelatnost	Promicanje djelatnosti UP	Promicanje djelatnosti UP	Promicanje standarda i najboljih praksi	Standardiziranje i normiranje industrija i djelatnosti
Vrsta članstva	Nacionalne članice	Nacionalne članice, pojedinačno članstvo	Nema članstva, partnerske organizacije	Nacionalna standardizacijska i normizacijska tijela
Broj članova	60	97 nacionalnih članica, članovi iz 207 zemalja	-	3400 normizacijskih tijela diljem 220 država svijeta

ISO 21500 je stvoren temeljem širokog konsenzusa između brojnih stručnjaka među kojima su i oni iz PMI organizacije koja je kreirala PMBOK i nekih drugih koji su dobro upoznati sa PRINCE2 standardom. Ti eksperti naporno su radili da bi postigli konsenzus i da bi spriječili moguće nedostatke standarda, pa zbog toga možemo reći da je ISO 21500 rezultat rada i napora većine struke iz područja upravljanja projektima. Nadalje, ISO 21500 je napravljen kao krovni standard nad svim postojećim standardima i deskriptivnog je karaktera. Taj deskriptivni karakter i činjenica da je stvarno generički standard odaje dojam da ga je lako moguće primijeniti u bilo kakvom tipu projekta i zato je odabran da ide u daljnju razradu.

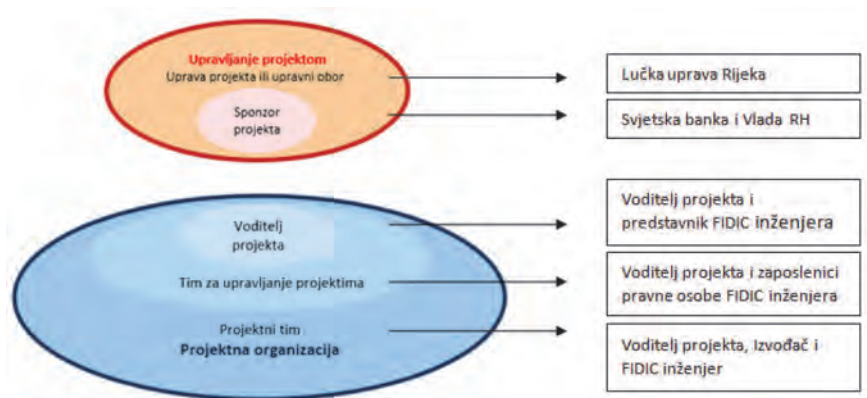
3 Studija slučaja - Zagrebačka obala

Prva faza projekta izgradnje Zagrebačke obale ujedno je i faza koja je analizirana u ovom radu. Gradnja je počela u kolovozu 2014., a završetak je planiran u lipanju 2018. Vrijednost je projekta 88 milijuna eura, što uključuje dužinu obale od 400 m s prosječnom širinom 300 m i prosječnom dubinom 20 m. Prva faza ustvari je projekt za sebe te je u ovom trenutku samo taj dio predviđen i ugovoren. Konstrukcija se sastoji od 49 kesonskih stupova visokih 22 metara i teških 4000 tona. Uz to je i 4000 šljunčanih pilota kojima će se uz privremeni zemljani nasip nakon ugradnje tih pilota ugraditi i geomreža te će se izvesti stalni podmorski nasip (eng. *jet grouting*) zato što je temeljno tlo vrlo rahlo, odnosno u velikom obujmu pjeskovito i glinovito. Financiranje projekta,

prva faza; zajam Svjetske banke (70,6 milijuna eura), ostatak od 15 % investicije (17,5 milijuna eura) osigurala Lučka uprava Rijeka.

3.1 Pozicioniranje projekta prema ISO 21500 standardu i opis strukture upravljanja projektom

Jedan od najvažnijih koncepata koji je razrađen u ISO 21500 standardu jest koncept koji projekt smješta u šire okruženje i daje mu kontekst te time voditelju projekta ne dopušta da zaboravi na kontekst i na dugoročne ciljeve koje projekt treba ispuniti.



Slika 1. Pozicioniranje projekta naspram ISO 21500 standarda dionika (izvor: vlastiti rad autora, prilagođeno prema [2])

Lučka uprava Rijeka (LUR), kao investitor i kreator programa projekta u kojem je Zagrebačka obala, obavlja najvišu upravljačku funkciju, tj. predstavlja upravu projekta kako to ISO 21500 prezentira. Sponzor su Svjetska banka kao glavni investitor i Vlada RH kao izdavatelj garancija i glavni voditelj ovog državnog poduzeća. Voditelj projekta imenovan je u suglasnosti sa Svjetskom bankom, Lučkom upravom i Vladom RH, a njegov tim ovisno o fazi projekta tvore razni sudionici.

3.2 Grupe procesa za upravljanje projektima

Faza inicijalizacije - Svjetska banka partner je Lučke uprave Rijeka na projektu Zagrebačke obale. Partneri su još bili i Grad Rijeka, Pomorski fakultet Rijeka, Hrvatski Hidrografski institut. *Faza planiranja* - FIDIC inženjer ima veći opseg zaduženja u smislu izrade planova UP, no neke procese provodi voditelj projekta angažiran od strane Lučke uprave, a neki procesi se ne planiraju detaljno i sustavno. *Grupa procesa Implementacija sa detektiranim isporukama* - Prema riječima FIDIC inženjera taj proces je pola na voditelju projekta od strane Lučke uprave, a pola na FIDIC inženjeru koji većinski

vodi projekt u fazi izvršenja. *Grupa procesa Kontrola sa detektiranim isporukama* - Gotovo svi procesi upravljanja projektom koji pripadaju kontroli ulaze u nadležnost FIDIC inženjera. Priprema nabave u nadležnosti je Izvođača, a upravljanje projektnim timom i upravljanje komunikacijama većim dijelom je u nadležnosti voditelja projekta. U ovoj fazi izvršenja FIDIC inženjer preuzima tu ulogu, dok voditelj projekta Lučke uprave obavlja komunikaciju s medijima, strukom i ostalim posrednim sudionicima. *Grupa procesa Zatvaranje sa detektiranim isporukama* - Zatvaranja projekta i u prvoj i u drugoj fazi određena procedura zatvaranja projekta ugovorom, a proces naučene lekcije svatko radi interno.

3.3 Kratak intervju sa FIDIC inženjerom - operativno vođenje projekta

1. Da li postoji imenovani voditelj projekta? Na ovome projektu ne postoji imenovan voditelj projekta u smislu Zakona o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje. Postoji imenovan voditelj projekta od strane Lučke uprave Rijeke (LUR) kao investitora projekta koji ima značajnu funkciju u fazi pripreme sve do potpisivanja ugovora o gradnji, dok u fazi izvođenja FIDIC inženjer radi vrlo velik broj operativnih aktivnosti koje prema određenim standardima pripadaju aktivnostima vođenja projekta.

2. Da li koristite neki standard za upravljanje projektom te koje metode upravljanja primjenjujete? Ne koristi se jedan standard za UP već se koriste prethodno stečena znanja iz upravljanja projektom. Najčešće se brainstormingom ideja na grupnim sastancima tima za upravljanje predlaže kako i kada će se izvoditi aktivnosti i tko je za njih zadužen, te se to kasnije formulira u obliku zapisnika koji su svi obavezni potpisati, a gospodin Matej Zupčić (fizička osoba FIDIC inženjer) kreira komunikacijski plan. Koristi se i nekoliko aplikacija za vremensko i financijsko planiranje.

3. Da li znate što je ISO 21500 i ako da, planirate li ga upotrebljavati u budućnosti? Površno smo upoznati sa činjenicom da postoji. Svakako ćemo ga detaljno proučiti i ako bude moguće, primjenjivati iskustva iz prakse koja standard zastupa. Prepoznatljivost ISO standarda je velika i sigurno je da će i ostali slijediti u njegovoj primjeni.

4 Zaključak

U radu su analizirana četiri istaknuta međunarodna standarda za upravljanje projektima, što je rezultiralo kratkom usporedbom na temelju koje je ISO 21500 odabran za daljnje razmatranje u studiji slučaja. Razlog odabira je činjenica da su stručnjaci iz svih u radu navedenih profesionalnih udruženja participirali u njegovoj izradi, te je temeljen na konsenzusu velikog broja stručnjaka iz područja UP. Kroz studiju slučaja analizirani su podaci o projektu koji je pozicioniran unutar koncepta standarda ISO 21500. U smislu uprave projekta ovaj projekt ispunjava kriterije zadane u standardu.

Ako promatramo primjenu znanja i provođenje procesa definiranih standardima za UP, oni se većinski primjenjuju, ali proizvoljno, odnosno upravljanje u projektu nije strukturirano kroz pet grupa procesa i četrdeset dva procesa propisanih u samom standardu. Upravljanje građevinskim projektima kao specifičnu djelatnost treba još više promovirati kroz institucije i fakultete, iako je velik pomak napravljen u smislu regulative koja propisuje obvezu imenovanja voditelja za velike projekte. Sam voditelj projekta naveo je da će ubuduće raditi na tome da se implementira ISO 21500 standard jer ga prepoznaje kao nešto što donosi dobrobiti. U Hrvatskoj postoji potreba za daljnjom edukacijom i širenjem najboljih iskustava iz prakse, te za razvojem specifičnih znanja u upravljanju građevinskim projektima.

Literatura

- [1] Coesmans, P., Fuster, M., Garde Schreiner, J., Goncalves, M., Huynink, S., Jaques, T., Pugačevskis, 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) pp. 559-568.
- [3] Zandhuis, A., Stellingwerf, R.: ISO 21500: Guidance on a Project Management - A Pocket Guide, Van Haren Publishing, 2013.
- [4] Grau, N.: Standards and Excellence in Project Management - In Who do we trust?, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, John-Paris Pantouvakis, Greece, Elsevier Ltd, 10-20, 2013.
- [5] Papke-Shields, K.C., Beise, C., Quan, J.: Do project managers practice what they preach, and does it matter to project success?, *International Journal of Project Management*, 28 (2010), pp. 650-662., 10.1016/j.ijproman.2009.11.002
- [6] Ipma World, <http://www.ipma.world/>, pristupljeno: 30.5.2016.
- [7] Project Management Institute, <https://www.pmi.org/>, pristupljeno 30.5.2016.
- [8] Project Management Institute.: A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), 4. izdanje, Project Management Institute, 2008.
- [9] AXELOS, <https://www.axelos.com/>, pristupljeno: 30.5.2016.
- [10] Murray, A., Bennett, N., Edmonds, J., Patterson, B., Taylor, S., Williams, G.: *Managing Successful Projects with PRINCE2*, 2 (2009)
- [11] International Organization for Standardization, <https://www.iso.org/home.html>, pristupljeno: 30.5.2016.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Prometnice

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.19>

Razina usluge na dvotračnim izvangradskim cestama

Boris Čutura

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet
kontakt: boriscutura@gmail.com

Sažetak

Razina usluge (eng. *Level of Service* - LOS) dvotračnih izvangradskih cesta u BiH i susjednim državama računa se prema HCM 2010 (Highway Capacity Manual 2010) metodologiji. Definira se na osnovi mjera efikasnosti prosječne brzine putovanja (eng. *Average Travel Speed* - ATS) i postotka vremena provedenog u koloni (eng. *Percent Time Spent Following* - PTSF). Parametar PTSF je definiran kao postotak vremena koje vozilo provede u koloni vozeći se iza sporijeg vozila. Taj parametar određuje slobodu manevriranja i udobnost vožnje i povezan je sa sigurnosti prometa jer vožnja u koloni izaziva nervozu kod vozača i opasno ponašanje (nedopuštena pretjecanja, itd.). Zato je postotak vremena provedenog u koloni PTSF najvažnija mjera u smislu opisa kvalitete odvijanja prometa. HCM je definirao vrijeme slijeda (headway) tri sekunde između vozila, kao mjeru za određivanje na terenu. Mnoga istraživanja su pokazala značajna odstupanja na terenu u odnosu na proračune prema HCM metodologiji, a rezultat su drukčijih uvjeta toka pojedinih područja kao i nedostataka samog modela. U radu su prezentirana dosadašnja istraživanja i ciljevi za definiranje modela proračuna PTSF-a (razine usluge).

Ključne riječi: razina usluge, postotak vremena provedenog u koloni

Level of service on two-way rural roads

Abstract

The level of service (LOS) on two-way rural roads in Bosnia and Herzegovina and neighbouring countries is calculated according to HCM 2010 (Highway Capacity Manual, 2010) methodology. It is defined by measuring efficiency of the average travel speed (ATS) and the percent time spent following in platoon (PTSF). The PTSF parameter is defined as the percentage of time that vehicle drives behind a slower vehicle in platoon. This parameter defines the freedom of manoeuvring and driving comfort, and is related to traffic safety because driving in platoon causes driver nervousness and dangerous behaviour (prohibited overtaking, etc.). That is why the PTSF is the most important measure for the quality of traffic flow. The HCM defines three second headway between the vehicles as a field measure. Many studies have shown significant field deviations compared to calculations according to HCM methodology, as a result of different traffic flow conditions in certain areas, and due to imperfections of the model itself. The paper presents the research conducted so far and goals for defining the model for the calculation of PTSF (level of service).

Keywords: level of service, percent time spent following

1 Uvod

Razina usluge (eng. *Level of Service* - LOS) dvotračnih izvangradskih cesta u BiH i susjednim državama računa se prema HCM 2010 (Highway Capacity Manual 2010) metodologiji [1].

LOS na dvotračnim izvangradskim dionicama definira se na osnovi mjera efikasnosti prosječne brzine putovanja (eng. *Average Travel Speed* - ATS) i postotka vremena provedenog u koloni (eng. *Percent Time Spent Following* - PTSF). HCM 2010 ceste dijeli na tri klase. Prvu klasu čine daljinske ceste s očekivanom velikom brzinom i slobodom voženje, a LOS se određuje na osnovi prethodno navedenih mjera efikasnosti. U drugu klasu ubrajaju se ceste uglavnom kraćih duljina (obično povezuju ceste prve klase) gdje vozači ne očekuju velike brzine. LOS tih cesta računa se samo prema PTSF-u. HCM 2010 [1] uveo je i treću klasu cesta kojoj pripadaju ceste umjereno razvijenih područja ili ceste kroz male gradove. Značajke tih cesta jesu ograničene brzine i miješanje lokalnog s tranzitnim prometom.

Parametar PTSF je definiran kao postotak vremena koje vozilo provede u koloni vozeći se iza sporijeg vozila. Taj parametar definira slobodu manevriranja i udobnost vožnje. Povezan je sa sigurnosti prometa jer vožnja u koloni izaziva nervozu kod vozača i opasno ponašanje (nedopuštena pretjecanja, itd.). Zato je postotak vremena provedenog u koloni PTSF najvažnija mjera u smislu opisa kvalitete odvijanja prometa. Parametar PTSF (kao i ATS) moguće je definirati na dva načina, računski i mjerenjem na terenu. HCM je definirao vrijeme slijeda (eng. *headway*) 3 sekunde između vozila kao mjeru za određivanje na terenu. Ako je vrijeme slijeda manje od 3 sekunde, vozila su u koloni, a u suprotnom nisu u koloni.

Proračun prema HCM 2010 izvodi se prema izrazu

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np,PTSF} \left(\frac{V_{d,PTSF}}{V_{d,PTSF} + V_{o,PTSF}} \right) \quad (1)$$

gdje su:

- $PTSF_d$ - postotak vremena provedenog u koloni u analiziranom smjeru
- $BPTSF_d$ - bazni postotak vremena provedenog u koloni u analiziranom smjeru
- $f_{np,PTSF}$ - korekcijski faktor za PTSF postotka zona bez pretjecanja (eng. *no-passing zones*)
- $V_{d,PTSF}$ - prometni tok analiziranog smjera (OV/h)
- $V_{o,PTSF}$ - prometni tok suprotnog smjera (OV/h)

Istraživanja u svijetu pokazala su značajna odstupanja na terenu u odnosu na proračune prema ovoj metodologiji [2-13], a rezultat su drukčijih uvjeta toka pojedinih područja kao i nedostataka samog modela. Posljednjih desetljeća u regiji nisu provedena istraživanja na ovu temu i HCM se u praksi rabi u izvornom obliku.

Analize i rezultati prikazani u radu temelje se na terenskim istraživanjima karakteristika prometnih tokova na mreži magistralnih cesta na području Hercegovine.

2 Terenska istraživanja na dvotračnim izvangradskim cestama

Provedena su terenska istraživanja na magistralnim cestama na području Hercegovine i odabrana je kao reprezentativna dionica ceste M17. Ta cesta pripada europskom koridoru E73 i pruža se duž cijele države povezujući njezin jug i sjever.

Karakteristike odabrane dionice su relativno dobra geometrija i za BiH prilike značajno prometno opterećenje. Analizirana dionica magistralne ceste M17 nalazi se između Mostara i Jablanice (slika 1.).



Slika 1. Dionica magistralne ceste M 17 Mostar – Jablanica (točke 1-5 predstavljaju mjerna mjesta)

Dionica je 13 km udaljena od centra grada Mostara i pruža se u duljini od 22 km. Cesta je izvangradska dvotračna, ujednačene geometrije i prometnog opterećenja i može se smatrati homogenom dionicom. Postoji nekoliko priključaka na tu dionicu, ali s obzirom na zanemariv promet ne utječu na odvijanje prometa glavne ceste. Zona za pretjecanje ima 30 %, a 70 % ih je bez pretjecanja (eng. *No-passing*).

Istraživanju se pristupilo mikroskopski na način da su se definirale katakteristike pojedinih sudionika u prometu mjerenjem parametara toka.

Na pet mjernih presjeka dionice obavljena su snimanja glavnih parametara kao što su broj i klasifikacija vozila po tipu i smjeru, brzina i vrijeme slijeda. Za snimanje spomenutih prometnih parametara korištena su prenosiva brojila MetroCount 5600 (slika 2.). Paralelno tomu povremeno su se provodila snimanja videokamerama koja su poslužila za kontrolu brojila i dobivanje dodatnog uvida u odvijanje prometa (slika 3.). Mjerenja su provedena tijekom travnja 2017. godine.



Slika 2. Brojilo na lokaciji 4

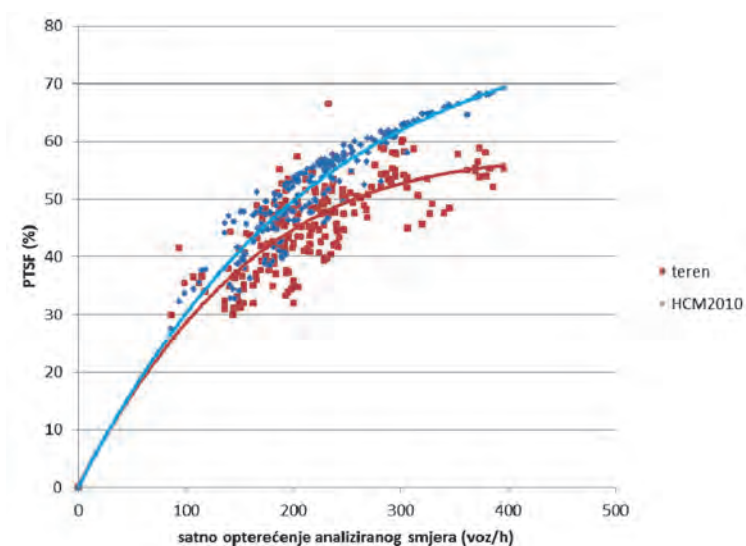
Kao rezultat snimanja dobiveni su broj i klasifikacija vozila, brzine i vrijeme prolaska svakog vozila po smjeru. Vrijeme prolaska omogućuje utvrđivanje nalazi li se pojedino vozilo u koloni.



Slika 3. Snimanje videokamerom na lokaciji 5

3 Rezultati istraživanja

Nakon obrade terenskih rezultata dobivene su vrijednosti PTSF-a na osnovi regresijskih krivulja za različite vrijednosti opterećenja analiziranog i suprotnog toka po navedenim presjecima i sumarno za cijelu dionicu. Također su izvedeni proračuni PTSF-a prema HCM 2010 za ista opterećenja i za 70 % zone bez pretjecanja. Rezultati su prikazani grafikonom na slici 4.

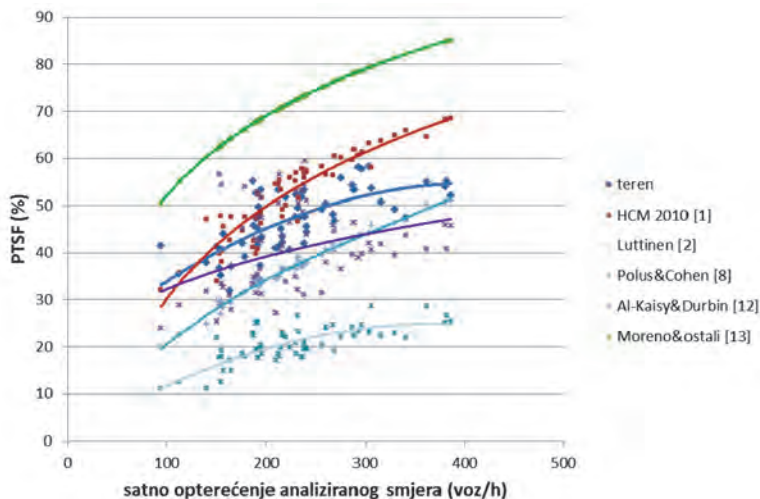


Slika 4. PTSF dobiven na terenu i izračunan u HCM 2010

Na grafikonu se može primijetiti razlika u rezultatima dobivenim na terenu i proračunom prema HCM 2010.

Također je izveden proračun i prema modelima drugih istraživača i utvrđeno je da niti jedan od modela nije prikladan za naše uvjete (slika 5.).

Razlike u rezultatima HCM-a i terenskih mjerenja dosežu od 20 % za manja, do 10 % za veća opterećenja. Cilj istraživanja je dobiti model koji će pojednostaviti proračun i povećati preciznost proračuna (5 – 10 % maksimalno odstupanje).



Slika 5. PTSF dobiven na terenu i izračunan prema nekoliko modela

Prema prethodno navedenome mogu se primijetiti znatne razlike u vrijednostima PTSF-a dobivenima na terenu, HCM 2010 i ostalim metodologijama.

Na osnovu dosadašnjih analiza i drugih istraživanja razloge treba tražiti u sljedećem: kalibracija na lokalne uvjete nije prikladna. Tu se prije svega misli na utjecaj brzina koje HCM 2010 ne uzima kao relevantne, a primjerice istraživanja u Finskoj [2] pokazala su da postoje razlike za brzine 80 i 100 km/h.

Utjecaj zona bez pretjecanja (eng. *no-passing zones* - NPZ) prema HCM 2010 također nije prikladan za karakteristike na našim mrežama cesta. Većina dionica ima NPZ u rasponu između 70 i 100 %, a prema HCM-u vrijednosti PTSF-a gotovo su jednake, što ne odgovara rezultatima na terenu.

4 Zaključak

Na temelju opisanog može se zaključiti da su nužne prilagodbe HCM metodologije (ili nova) na uvjete u okruženju, kao i poboljšanja uvođenjem novih temeljnih postavki i pristupa.

Provedena istraživanja dovode do sljedećih zaključaka:

- HCM daje veće rezultate proračuna od onih na terenu
- Utjecaj zona bez pretjecanja u rasponu 70 – 100 % nije prikladan za naše uvjete.

S obzirom na svega navedeno, potrebno je izraditi model proračuna PTSF-a koji bi bio prikladan za uvjete koji prevladavaju u BiH.

Literatura

- [1] Transportation Research Board.: Highway Capacity Manual. Fifth Edition, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 2010.
- [2] Luttinen, R.T.: Percent Time-Spent-Following as Performance Measure for Two-Lane Highways. Transportation Research Record. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C. 1776, pp. 52–59, 2001.
- [3] Dixon, M.P., Sarepali, S.S.K., Young, K.A.: Field Evaluation of Highway Capacity Manual 2000 Analysis Procedures for Two-Lane Highways. Transportation Research Record: Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C. 1802 (2002), pp. 125–132.
- [4] Al-Kaisy, A., Durbin, C.: Estimating Percent Time Spent Following on Two-lane Highways: Field Evaluation of New Methodologies, Transportation Research Board 86th Annual Meeting, January 21-25, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.
- [5] Al-Kaisy, A., Durbin, C.: Evaluating New Methodologies for Estimating Performance on Two-lane Highways, Canadian Journal of Civil Engineerin NRC Research Press, 35 (2008) 7, pp. 777–785.
- [6] Al-Kaisy, A., Karjala, S.: Indicators of Performance on Two-Lane Rural Highways: Empirical Investigation, Transportation Research Record. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., 2071 (2008) 1, pp. 87–97.
- [7] Polus, A., Cohen, M.: Theoretical and Empirical Relationships for the Quality of Flow and for a New Level of Service on Two-Lane Highways. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 135 (2009) 6, pp. 380–385.
- [8] Al-Kaisy, A., Freedman, Z.: Estimating Performance on Two-lane Highways: Case Study Validation of a New Methodology, Transportation Research Record 2173, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 72–79., 2010.
- [9] Polus, A., Cohen, M.: Estimating Percent-time-spent-following on Two-lane Rural Highways. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 19 (2011) 6, pp. 1319–1325.
- [10] Harwood, D.W. et al: Two-lane Road Analysis Methodology in the Highway Capacity Manual, In NCHRP Project, Washington, D.C., 20-7 (2003) 160.
- [11] Al-Kaisy, A., Karjala, S.: Car-Following Interaction and the Definition of Free-Moving Vehicles on Two-Lane Rural Highways, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 136 (2010) 10, pp. 925–931.
- [12] Al-Kaisy, A., Durbin, C.: Platooning on Two-lane Two-way Highways: An Empirical Investigation, 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Stockholm, Sweden 2011.

- [13] Moreno, A.T., Lorca, C., Sayed, T., Garcia, A.: Field evaluation of traffic performance measures for two-lane highways in Spain, Paper 14-0847, 93rd Transportation Research Board Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, DC., 2014.
- [14] Moreno, A.T., Lorca, C., Washburn, S., Bessa, J.E.J., Garcia, A.: Effect of Average Passing Zone Length on Spanish Two-Lane Highways Traffic Performance, Transportation Research Board 95th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.23>

Smanjivanje djelovanja lutajućih struja na kolosiječne konstrukcije

Katarina Vranešić, Stjepan Lakušić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za prometnice
kontakt: kvranesic@grad.hr

Sažetak

Korozija nastala djelovanjem lutajućih struja poznata je još od 19. stoljeća i razvoja prvih elektrificiranih željezničkih linija kod kojih se tračnice koriste kao povratni vod struje do elektrovočnih podstanica. Na mjestima oslabljene izolacije tračnice i njenog pričvrsnog pribora dio te struje istječe u tlo, beton ili drugi medij u kojemu se kolosijek nalazi i postaje lutajuća struja. Posljedice lutajućih struja manifestiraju se korozijom tračnice i pričvrsnog pribora, što može rezultirati lomovima na mjestima pričvršćenja ako se korozija ne uoči na vrijeme. Najučinkovitiji način sprječavanja lutajućih struja je djelovanje na izvoru struje, što je postignuto različitim metodama poput bolje izolacije tračnice i pričvrsnog pribora, manjim razmakom između elektrovočnih podstanica, osiguravanjem puta manjeg otpora za povrat struje, sustavima za prikupljanje lutajućih struja i sl. Od svih tih metoda najbolje učinke pokazuje bolja izolacija tračnice i pričvrsnog pribora. Danas su u upotrebi različite vrste pričvršćenja kod kojih se poboljšanjem izolacijskih svojstava dolazi do znatnog smanjenja istjecanja struje. U prikazu načina smanjenja lutajućih struja veoma dobre rezultate pokazuje i novi sustav pričvršćenja razvijen na Građevinskom fakultetu u Zagrebu – Zagreb 21 CTT.

Cljučne riječi: lutajuće struje, kolosijek, korozija, pričvršćenja tračnica

Reducing stray current effect on track structure

Abstract

Stray current corrosion is familiar since 19th century and development of first electrified railway lines. In railways, tracks are used as return conductor for current to the substation. In places where tracks and fastening insulation isn't good enough, part of current leaks to the ground and becomes stray current. The consequences of stray currents are manifested by the corrosion of the rails and rail fastenings. If the stray current corrosion isn't noticed on time, degradation and fracture of the rails and fastening will occur. The most effective way to reduce stray current is limiting current leakage at the source, which can be achieved by various methods, including better tracks and fastening insulation, closely-spaced substations, ensuring a low-resistance path for current returning to the substation, stray current collection system etc. Of all these methods, the best results are obtained by insulating the rail and fastenings. Different types of rail fastenings are in use today. Changing their insulation properties stray current can be significantly reduced. In reducing stray current at the source, Zagreb 21 CTT – a new tram track fastening system developed at Faculty of Civil Engineering in Zagreb shows very good results.

Keywords: stray current, track, corrosion, rail fastening

1 Uvod

U većini tramvajskih infrastruktura kao povratni put struje od vozila do elektrovučne podstanice koriste se tramvajске tračnice. Međutim, dio te struje na mjestima oslabljene izolacije izlazi iz tračnice i postaje lutajućom strujom. Na tim istim mjestima, kao posljedica istjecanja struje iz tračnice, dolazi do kemijske reakcije oksidacije, koja se nakon nekog vremena manifestira korozijom metala [1]. Posljedice korozije uzrokovane lutajućim strujama primijećene su i na tramvajskoj mreži u gradu Zagrebu. Naime, prilikom provođenja rekonstrukcija tramvajске pruge i uklanjanja opločenja te vizualnog pregleda kolosijeka, uočen je gubitak materijala na čeličnoj ploči ležajnog mjesta te gubitak materijala nožice tračnice na pričvrstnom mjestu [2] (slika 1.). Ustanovljeno je da je takav gubitak materijala posljedica djelovanja lutajućih struja.



Slika 1. Degradacija tračnice uzrokovana gubitkom materijala na poziciji pričvrstnog mjesta [3]

Da bi se lutajuće struje spriječile na njihovom izvoru, provode se mjere poput smanjivanja otpora tečenju struje u tračnicama te povećavanje električne otpornosti tračnice prema podlozi [4]. Smanjivanje otpora tečenju struje u tračnici može se postići kontinuiranim zavarivanjem tračnica, manjim razmacima između elektrovučnih podstanica te upotrebom tračnica manjeg otpora tečenju struje (tračnice veće mase) [4]. Povećavanje električne otpornosti tračnice prema podlozi ostvaruje se ovisno o načinu pričvršćenja tračnice. Kod pojedinačnog oslanjanja tračnica smanjivanje lutajućih struja postiže se izolacijom pričvrstnog pribora te oblaganjem tračnica elastomernim materijalima, a kod kontinuiranog pričvršćenja ugradnjom izolacijskog materijala oko tračnica cijelom duljinom kolosijeka [5, 6]. Smanjenju lutajućih struja pridonosi i dobra odvodnja kolosijeka [7]. Ne pokažu li ove mjere dobre rezultate, izvodi se sustav za skupljanje lutajućih struja [8].

2 Izolacija elemenata pričvršćenja tračnice

2.1 Kolosijeci s pojedinačnim osloncima tračnica

Kada je riječ o kolosijecima s pojedinačnim osloncima tračnica, za postizanje veće otpornosti tračnice prema podlozi potrebno je poboljšati izolaciju na mjestima pričvršćenja [9]. Primjer kolosijeka s ovakvim načinom pričvršćenja je tramvajska pruga u gradu Zagrebu gdje se koristi pričvrtni pribor povećane elastičnosti (sustav "PPE") te dvostruko elastični pričvrtni pribor (sustav "DEPP"). Kod ovih sustava osiguran je direktni kontakt između sidrenog vijka i čelične podložne ploče, što predstavlja put istjecanja struje iz tračnice [10]. Boljom izolacijom spriječio bi se dodir metala i reducirala količina lutajućih struja [7]. Istjecanje struje je određeno i održavanjem kolosijeka [11]. Dobrom odvodnjom kolosijeka smanjuje se količina lutajućih struja, a zablacenost smanjuje njegovu električnu otpornost, što je izraženo kod kolosijeka sa zastornom prizmom [7, 12]. Na slici 2. prikazano je stanje unutar tramvajskog kolosijeka s lošom odvodnjom.



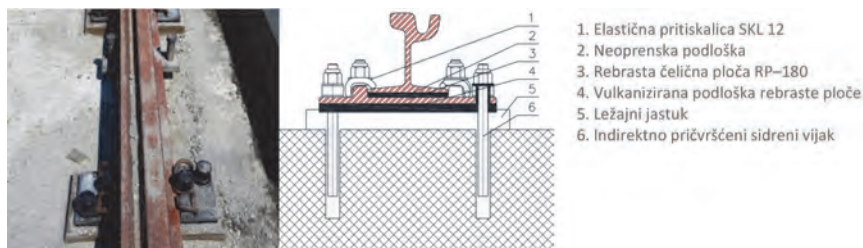
Slika 2. Stanje unutar tramvajskog kolosijeka s lošom odvodnjom

Danas su u upotrebi elastomerne podloške na mjestima pričvršćenja ispod tračnica čime se ostvaruje visoka razina izolacije. Međutim tijekom uporabe izolacijska svojstva podložki slabe i vidljivi su utjecaji lutajućih struja [11].

2.1.1 Sustavi pričvršćenja tramvajskih tračnica za povećanje otpornosti na lutajuće struje

Jedan od novijih sustava kojim je ostvarena bolja otpornost na istjecanje struje iz tračnica razvili su Lakušić, S. i suradnici na Građevinskom fakultetu u Zagrebu – Zagreb 21 CTT [3]. Njime se, s obzirom na bolju izolaciju pričvrstnog pribora, smanjuje istjecanje lutajućih struja. Rebrasta čelična ploča za oslanjanje tračnica, dobivena postupkom valjanja u čeličani, osnovni je element pričvršćenja. Za pričvršćenje tračnice predviđeni su T-vijci te SKL-12 pritiskalice. Sidrenje ploče je ostvareno preko zasebnog sidrenog vijka i zasebne elastične podloške projektirane za taj sustav (slika 3.). Pojedini elementi sustava, poput sidrenih vijaka i podložnih ploča u potpunosti su izolirani čime je

sprječen direktan kontakt čeličnih sidrenih vijaka i betonske podložne ploče, a samim time i istjecanje struja [10]. Taj je sustav namijenjen za rekonstrukcije postojećih kolosijeka izvedenih na betonskoj podlozi te za izgradnju novih kolosiječnih konstrukcija u urbanim sredinama.



Slika 3. Sustav pričvršćenja Zagreb 21-CTT, lijevo – izvedeno stanje, desno – poprečni presjek ležajnog mjesta [3, 10]

Vrlo dobra izolacijska svojstva ostvarena su i kod sustava Pandrol VIPA SP dvostrukom izolacijom između tračnice i podložne čelične ploče te između podložne čelične ploče i betonske ploče [11]. Taj sustav karakterizira pričvršćenje tračnice za podložnu ploču bez vijaka i bilo kakvog sustava navoja. Pandrol VIPA SP se može ugrađivati na betonskoj podlozi, čeličnim, betonskim ili drvenim pragovima [13].

2.1.2 Oblaganje tračnice elastomernim materijalima

Vulkaniziranim gumenim profilima za oblaganje tračnica znatno je smanjeno istjecanje struje iz tračnice prema podlozi, bez obzira na atmosferske uvjete [5, 14]. Primjenjivi su za sve medije u kojima se nalazi tračnica (slika 4.) [5]. Oblaganje tračnica izvodi se kontinuirano, a pričvršćenje se obavlja nakon što je tračnica obložena gumenim profilima (slika 4.) [15].



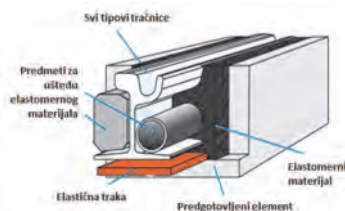
Slika 4. Vulkanizirani gumeni profili: a) profili ugrađeni oko tračnice, b) priprema tračnice za zavarivanje, c) mjesto pričvršćenja tračnice [15]

Prednosti ovakvog načina izolacije je jednostavna proizvodnja, ugradnja i održavanje, potpuna izolacija tračnice, a osim lutajućih struja, smanjuju se buka i vibracije [9]. Me-

đutim, tijekom uporabe i djelovanjem prometnog opterećenja, različitih vremenskih uvjeta i vode koja se zadržava u kolosijeku, dolazi do degradacije izolacijskog materijala i pojave lutajućih struja [9].

2.2 Kolosijeci s kontinuiranim oslanjanjem tračnica

Kod ovog tipa kolosijeka tračnice se ugrađuju u utore izvedene u predgotovljenoj betonskoj ploči ili čelične "U" profile, nakon čega se obavlja zapunjavanje prostora između tračnice i utora cijelom duljinom kolosijeka (slika 5.) [16]. Ugrađuje se homogena elastična smjesa kojom je ostvareno pričvršćenje, kao i električna izolacija [6]. Na taj se način postiže kontinuirana izolacija tračnice i sprječavanje lutajućih struja. Kako bi se postigla ušteda materijala, cijelom duljinom uzduž tračnice se postavljaju PVC cijevi ili drugi umeci [6].



Slika 5. Prikaz tračnice s kontinuiranim oslanjanjem, [17]

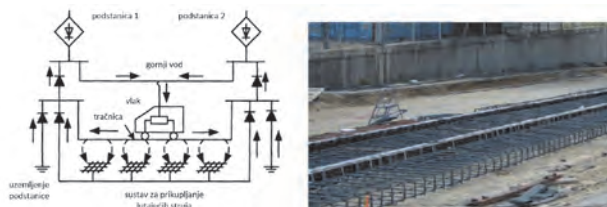
3 Položaj elektrovnih podstanica

Smanjivanjem udaljenosti između elektrovnih podstanica, smanjuje se potencijal tračnice prema tlu prilikom povrata struje u podstanicu. Ovu mjeru je moguće provoditi kod novih kolosiječnih konstrukcija, međutim smanjivanjem udaljenosti između podstanica povećavaju se troškovi izgradnje [7]. Boljoj električnoj provodljivosti pridonosi i zavarivanje tračnica čime se ostvaruje veća ili jednaka provodljivost kao kod kontinuirane tračnice [18]. Smanjivanje lutajućih struja se također omogućuje ugradnjom tračnica veće mase s obzirom na to što one pružaju manji otpor tečenju struje [7].

4 Sustav za skupljanje lutajućih struja

Sustav za skupljanje lutajućih struja "presijeca" put strujama koje su pronašle put iz tračnice i sprječava njihov ulazak u tlo [8]. Sastoji se od čeličnih mreža koje su razdvojene na segmente duljine oko 300 m i međusobno povezane vodičem dobre električne provodljivosti (najčešće bakrom) te spojene na negativnu sabirnicu u elektrovnju podstancu (slika 6.). Za čelične se mreže može iskoristiti armatura u armira-

nobetonskoj ploči ili armatura tunela, a katkad je čelična mreža postavljena samo radi prikupljanja lutajućih struja te nema nikakvu konstrukcijsku ulogu [7,19].



Slika 6. Sustav za skupljanje lutajućih struja: a) shematski prikaz [19]; b) armaturni čelik povezan u sustav za skupljanje struja kod ugrađenih kolosijeka [18]

5 Zaključak

Lutajuće struje su nuspojava svih elektrificiranih željezničkih linija koje koriste tračnice kao povratni put struje do elektrovučnih podstanica. Korozija koja nastaje kao posljedica djelovanja lutajućih struja može dovesti do ozbiljnih degradacija kolosijeka ako ona nije uočena na vrijeme. Danas su razvijene mnoge metode kojima se pokušava spriječiti štetno djelovanje lutajućih struja, a najučinkovitije rješenje predstavlja smanjivanje istjecanja struja na izvoru. Kombinacijom metoda kao što su bolja izolacija tračnice od podloge (primjena adekvatnih sustava pričvršćenja koji imaju veliku električnu otpornost), ugradnja tračnica manjeg električnog otpora te bolja odvodnja kolosijeka, može se istjecanje struje znatno smanjiti. Ako se ovim metodama ipak ne postignu dovoljno učinkoviti rezultati, izvodi se sustav za prikupljanje lutajućih struja. On "presijeca" put strujama koje isure iz tračnice i vraća ih u elektrovučnu podstanicu. Veoma dobre rezultate pokazuje ugradnja kontinuiranog izolacijskog materijala cijelom duljinom kolosijeka, što se ostvaruje kod montažnih kolosijeka s kontinuiranim oslanjanjem tračnica. Da bi se produljio vijek trajanja kolosijeka, a utjecaj lutajućih struja još više smanjio i samim time povećala sigurnost korisnika tračničkih infrastruktura, pogotovo u urbanim sredinama, potrebno je usavršavati postojeće metode smanjivanja lutajućih struja na izvoru te razvijati nove, poput sustava Zagreb 21 – CTT, koji bi pokazivali još bolje rezultate uz što jednostavnije i ekonomičnije metode ugradnje i održavanja. Inovativnost sustava Zagreb 21-CTT prepoznata je i na međunarodnoj izložbi inovacija ARCA 2016, gdje je taj sustav nagrađen zlatnom medaljom.

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] Vranješević, M.: ZET - Korozija tramvajskih tračnica i pričvrsnog pribora, radni materijal, 2014.
- [3] 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. Šakić, Ž., KoREMA, Krapina, pp. 1–4, 2016.
- [4] Stray current corrosion induced by transit systems, <http://corrosion-doctors.org/StrayCurrent/Transit-Systems.htm>, pristupljeno: 15.07.2017.
- [5] Track Superstructure, <http://sealing.datwyler.com/industry-solutions/civil-engineering/track-superstructure.html>, pristupljeno: 15.07.2017.
- [6] Bahra, K.S., Catlow, R.B.: Control of stray currents for DC traction systems, *International Conference on Electric Railways in a United Europe*, 2031 (1995) 8, pp. 136-142.
- [7] Edilon sedra ERS for trams, light and guide rail edilon)(sedra, <https://www.edilonsedra.com/edilonsedra-ers-trams/>, pristupljeno 15.07.2017.
- [8] Cotton, I., Charalambous, C., Aylott, P., Ernst, P.: Stray current control in DC mass transit systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (2005), pp. 722–730, DOI: 10.1109/TVT.2004.842462
- [9] Memon, S., Fromme, P.: Use of Rail Boot and Collection Mat To Control the Electrolysis of Rail and utilities in DV powered transit agencies, *Joint Rail Conference JRC 2014*, Colorado Springs, CO, USA, 2014.
- [10] Lakušić, S., Haladin, I., Koščak, J.: Izvještaj o kontroli stanja gornjeg ustroja kolosijeka na ispitnoj dionici tramvajske pruge na Savskoj ulici, 2015.
- [11] Stray Current Traction Return Current, *Electric Traction Systems*, London, IET, pp. 271–281., DOI: 10.1049/ic.2010.0200
- [12] Zan, K., Ramos, M., Mawleq, V., Singh, S.: Recommended Maintenance Practices for Stray Current on DC electrified systems, *Joint Rail Conference JRC 2014*, Colorado Springs, CO, USA, 2014.
- [13] Pandrol Rahee Technologies, <http://www.pandrolrahee.com/product-ballastless-vipa.html>.20.07.2017.
- [14] Weblet Importer, <http://www.transcomfort.pl/rcs-system,43,en.html>, pristupljeno: 15.07.2017
- [15] Brošura: *Datwyler: Rail comfort system*
- [16] Lakušić, S., Vajdić, M.: Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama, *Gradjevinar*, 63 (2011), pp. 125–134
- [17] Brošura: *Edilon)(sedra: ERS Embedded Rail System*

- [18] Memon, S.A., Fromme, P.: Stray Current Corrosion Mitigation, Testing and Maintenance in DC Transit System, *Comrail: Railway Engineering, Design and Operation*, WIT Press, pp. 205-2013, 2016.
- [19] Niasati, M., Gholami, A.: Overview of stray current control in DC railway systems, *Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age, Hong Kong, China*, pp. 237–242, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.10>

Primjena računalnih simulacija pri geometrijskom oblikovanju cestovnih raskrižja

Šime Bezina

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
kontakt: sbezina@grad.hr

Sažetak

Sve učestalija primjena informatičke tehnologije u gotovo svim sferama suvremenog društva, pa tako i u području projektiranja cesta i raskrižja, dovela je do razvoja simulacijskih modela za provjeru prozivnosti mjerodavnih vozila, kojima se nastoji što vjernije prikazati stvarno kretanje vozila po voznim površinama. Za razliku od klasičnih metoda provjere prozivnosti mjerodavnih vozila (grafičke metode, numeričke metode, fizikalni modeli), provjera uvjeta prozivnosti primjenom računalnih simulacija je jednostavna, precizna i brza te omogućuje modeliranje različitih tipova mjerodavnih vozila proizvoljnih dimenzija. U ovom radu opisana je primjena računalne simulacije vožnje mjerodavnih vozila u postupku ispitivanja prozivnosti tijekom oblikovanja cestovnih raskrižja.

***Ključne riječi:** računalna simulacija, cestovna raskrižja, mjerodavno vozilo, ispitivanje prozivnosti*

Use of computer simulations in geometrical modelling of road intersections

Abstract

An increasing use of information technology in almost all spheres of modern society and science, and thus also in the sphere of road and intersection design, has led to the development of simulation models for swept path analysis of design vehicles, which aim at showing real vehicle movement on driving surfaces as accurately as possible. Unlike traditional methods used for swept path analysis of design vehicles (graphical methods, numerical methods, physical models), the use of computer simulations in swept path analysis is simple, fast and accurate, and it enables modelling various types of design vehicles of arbitrary dimensions. The application of computer simulation of the design vehicle movement during swept path analysis conducted in the scope of road intersection design is described in this paper.

***Keywords:** computer simulation, road intersections, design vehicle, swept path analysis*

1 Uvod

Svako projektirano cestovno raskrižje (trokrako, četverokrako, kružno i turbokružno), uz uvjete sigurnosti i propusne moći, mora ispuniti i uvjete provoznosti mjerodavnog vozila. Ti uvjeti se postižu osiguranjem odgovarajuće provodne širine, definirane trajektorijama kretanja najistaknutijih točaka mjerodavnih vozila te obostrano uvećane za zaštitnu širinu [1-7].

Provjera provoznosti se temelji na ispitivanju geometrije kretanja mjerodavnih vozila, tj. na definiranju trajektorija njihovog kretanja po voznoj površini. Jedina u potpunosti točna metoda za određivanje tih trajektorija je ispitivanje probnim vožnjama vozila na poligonu. Ta ispitivanja su iznimno zahtjevna, iziskuju opsežnu pripremu i značajna financijska sredstva, zbog čega se ne mogu primijeniti za veliki broj ispitivanja. Zbog toga se ova metoda u pravilu primjenjuje isključivo za verifikaciju rezultata ispitivanja preostalih metoda: grafičkih (šablone), analitičkih i simulacija kretanja primjenom fizikalnih modela [8].

Danas se provoznost mjerodavnog vozila ispituje isključivo simulacijom kretanja mjerodavnih vozila pomoću specijaliziranih računalnih programa. Računalna provjera provoznosti se u pravilu sastoji od definiranja linije vođenja i odabira mjerodavnog vozila. Dva najpoznatija/najrasprostranjenija računalna programa za simulaciju kretanja vozila su eng. *Vehicle Tracking* [9] i eng. *AutoTURN* [10].

Slijedi opis postupka oblikovanja cestovnih raskrižja u razini, prikazan u smjernicama i normama [1-7], te postupka ispitivanja provoznosti cestovnih raskrižja simulacijama vožnje mjerodavnih vozila primjenom navedenih računalnih programa.

2 Karakteristike računalnih programa za ispitivanje provoznosti

Osnovna prednost računalnih simulacija kretanja vozila je u tome što se na relativno jednostavan i brz način mogu definirati različiti tipovi vozila proizvoljnih dimenzija, zadavati različite linije vođenja i varirati skretni kutovi, a iscrtavanje trajektorija kretanja vozila brzo je i precizno.

Kao i svaki drugi računalni programi koji se primjenjuju u inženjerskoj praksi, i programi za simulaciju vožnje imaju ograničenja. Prilikom simulacije vožnje zanemareni su sljedeći čimbenici: dinamički utjecaji, mogući udari vjetera, utjecaj ubrzanja i usporenja, uzdužni i poprečni nagib prometne površine, koeficijent trenja, stanje pneumatika vozila i dr. [9]. Nadalje, proizvođači računalnih programa najčešće nemaju priložen dokaz o točnosti simulacija vožnje s obzirom na stvarno ponašanje vozila. Također napominju da ne snose odgovornost za pogreške i moguću štetu nastalu uslijed korištenja njihovih proizvoda [9].

Zbog toga da bi se utvrdila pouzdanost ovakvih programa, provedena su istraživanja u kojima su uspoređene širine provoznosti dobivene pomoću računalnih programa

za ispitivanje provoznosti s onima dobivenima vožnjom stvarnog vozila na poligonu. Rezultati istraživanja [11] su pokazali da su odstupanja od stvarno izmjerenih vrijednosti u granicama točnosti izvedbe cestovnih kolnika. Nadalje, uspoređeni su rezultati različitih računalnih programa za ispitivanje provoznosti (eng. *Vehicle Tracking* i *AutoTURN*) te je zaključeno da iscrtavaju približno jednake širine provoznosti (razlika je $\pm 4,0$ cm) [12]. Prema tome, zaključeno je da su računalni programi pouzdani te su pogodni za primjenu u istraživačkom radu tijekom iscrtavanja trajektorija kretanja vozila.

3 Oblikovanje cestovnih raskrižja i provjera provoznosti

Vozne površine kod cestovnih raskrižja razlikuju se posebnošću oblikovanja. U zonama cestovnih raskrižja putanje vozila prilikom lijevog i desnog skretanja karakterizira velika zakrivljenost te mala brzina kretanja vozila. Zbog toga je pri oblikovanju tih voznih površina potrebno ispitati geometriju kretanja vozila u krivinama malih polumjera iscrtavanjem trajektorija kretanja mjerodavnih vozila, a vozno-dinamički uvjeti oblikovanja mogu se zanemariti [13].

Na temelju pregleda važećih smjernica, pravilnika i normi [1-7] ustanovljeno je da se postupak geometrijskog oblikovanja cestovnog raskrižja zapravo izvodi u sljedeća tri koraka:

1. oblikovanje pojedinih projektnih elemenata raskrižja (rubovi kolnika, otoci, dodatni trakovi za lijevo i desno skretanje) i njihovo uklapanje u građevinsko-prometni projekt raskrižja,
2. provjera provoznosti projektiranog cestovnoga raskrižja za odabrano mjerodavno vozilo (šablonama ili računalnim programima),
3. ispravljanje projektnih elemenata cestovnoga raskrižja u slučaju da nisu ispunjeni uvjeti iz prethodnog koraka.

U nastavku je opisan postupak provjere provoznosti projektiranog cestovnoga raskrižja za odabrano mjerodavno vozilo primjenom specijaliziranih računalnih programa.

3.1 Odabir mjerodavnog vozila

Kako bi se ostvarilo sigurno i nesmetano odvijanje prometa na cestovnim raskrižjima nužno je ispravno odabrati mjerodavno vozilo za ispitivanje provoznosti. Izbor mjerodavnog vozila ovisi o strukturi prometnog toka, lokaciji promatranog raskrižja te o zastupljenosti vozila u regiji u kojoj se raskrižje nalazi.

Širina provoznosti ovisi o dimenzijama mjerodavnog vozila (ukupnoj duljini i širini, duljini prednjeg i stražnjeg prepusta te međuosovinskim razmacima). Dimenzije mjerodavnog vozila trebaju biti usklađene s Direktivom EU komisije [14]. Prema [14], sva vozila kao i skupovi vozila moraju imati takve uređaje da, pri vožnji u krugu, promjer

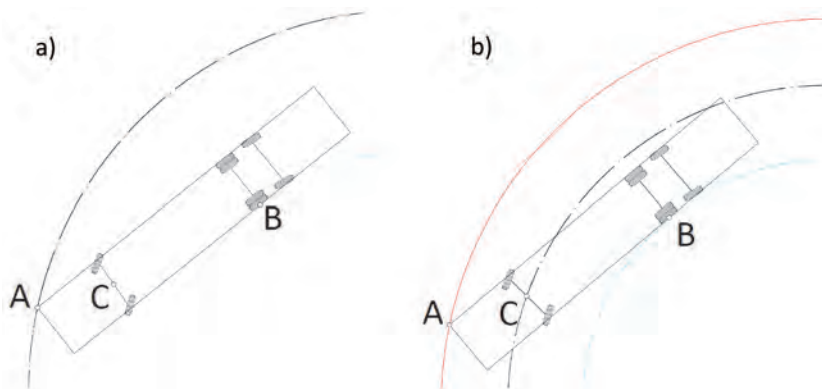
vanjske opisane kružnice bude najviše 25,0 m, a promjer unutarnje kružnice najmanje 10,6 m.

U pravilu, na izvangradskim raskrižjima mjerodavna vozila su: troosovinski autobus, kamion s prikolicom i tegljač s poluprikolicom, a na gradskim raskrižjima dvoosovinski autobus i kamion za odvoz smeća [15]. Prethodna istraživanja [16] su pokazala da je tegljač s poluprikolicom nepovoljniji od tegljača s prikolicom, a najveću širinu pri prolasku kroz raskrižje prebriše troosovinski autobus duljine 15,0 m [17].

3.2 Određivanje trajektorija kretanja mjerodavnog vozila

Svi elementi raskrižja moraju osigurati nesmetan prolazak mjerodavnoga vozila kroz raskrižje. Jedan od najznačajnijih parametara oblikovanja cestovnih raskrižja su trajektorije kretanja mjerodavnog vozila [18, 19, 20]. Trajektorije kretanja vozila su linije koje opisuju najistaknutije vanjske i unutarnje točke vozila (slika 1., točke A i B). Površina omeđena trajektorijama kretanja vozila naziva se širinom provoznosti. Trajektorije kretanja vozila koje prolazi kroz raskrižje određuju se na način da se kao ulazni parametri definiraju linije vođenja i dimenzije mjerodavnog vozila, na osnovni čega računalni program iscrta preostale trajektorije kretanja vozila.

Kod klasičnih trokrakih i četverokrakih raskrižja putanja vozila se u pravilu poklapa s trajektorijom definiranom vanjskom najistaknutijom točkom vozila (slika 1. a), točka A) dok se kod kružnih i turbokružnih raskrižja putanja vozila definira pomoću točke smještene u središtu prednje osovine (slika 1. b), točka C). Putanja vozila zadaje se pomoću polilinije, koja se u geometrijskom smislu sastoji od pravaca i kružnih lukova.



Slika 1. Širina provoznosti a) standardna raskrižja, b) kružna raskrižja

U skladu s razmatranim smjernicama, pravilnicima i normama [1-7] širinu provoznosti treba obostrano uvećati za iznos zaštitne bočne širine. Pritom je vrijednost zaštitne bočne širine u rasponu od 0,25 m do 1,00 m, ovisno o razmatranom dokumentu.

4 Rasprava

Pristup projektiranju cestovnim raskrižjima (trokrako, četverokrako, kružno i turbo-kružno) iskazan u tri koraka (oblikovanje pojedinih elemenata čvorišta i njihovo sastavljanje u građevinsko-prometni projekt, provjera provoznosti projektiranog čvorišta, korekcija projektnih elemenata ako nije zadovoljen uvjet provoznosti) sadrži čitav niz nedostataka i ograničenja. Glavni nedostatak u navedenom postupku je u tome što se provoznost provjerava nakon oblikovanja osnovnih elemenata i potom slijedi ispravljanje pogrešno oblikovanih elemenata. Takav postupak je dugotrajan i vrlo često zanemaren u praksi. Dodatni problem predstavlja činjenica da razmatrani dokumenti [1-7] nemaju detaljno definiran način na koji se provjerava provoznost, iako je u svima izričito navedeno da je provjera provoznosti prilikom konstrukcije raskrižja obvezna.

Nadalje, provjera provoznosti prema analiziranim njemačkim smjernicama [21] i hrvatskoj normi [1] provodi se pomoću šablona. Glavni nedostatak ispitivanja provoznosti pomoću šablona očituje se u tome što za pojedini tip vozila postoji šablona za jednu vrijednost polumjera i na raspolaganju je samo mjerilo (1:250 prema njemačkim smjernicama, 1:200 prema hrvatskim normama). Osim toga, postavlja se pitanje pouzdanosti šablona, jer se nigdje ne navodi provjera točnosti šablona sa stvarnim ponašanjem vozila. Navedeni nedostaci pokazuju da treba primjenjivati nove suvremene načine provjere provoznosti pomoću specijaliziranih računalnih programa namijenjenih iscrtanju trajektorija kretanja vozila [18, 19, 20].

5 Zaključak

Projektiranje cestovnih raskrižja iterativan je postupak koji započinje oblikovanjem osnovnih elemenata i njihovim sastavljanjem u građevinsko-prometni projekt. Nakon početnog oblikovanja slijedi izbor mjerodavnog vozila i ispitivanje uvjeta provoznosti. Ako raskrižje ne zadovoljava uvjete provoznosti, pristupa se modificiranju elemenata početnog oblikovanja sve dok uvjeti provoznosti ne budu ispunjeni.

Takav pristup projektiranju je dugotrajan i sadrži niz nedostataka među kojima se ističe taj što se provoznost provjerava nakon oblikovanja osnovnih elemenata. Sve navedeno upućuje na potrebu za promjenom principa na kojemu se zasniva oblikovanje raskrižja, odnosno polazište za oblikovanje osnovnih elemenata raskrižja treba biti geometrija kretanja vozila. Na taj način bi se uvelike pridonijelo smanjenju utrošenog vremena potrebnog za pravilno projektiranje raskrižja. Nadalje, radi osiguranja uvjeta provoznosti, provjeru treba provoditi pomoću pouzdanih alata kako bi rezultati bili što vjerniji realnoj situaciji.

Literatura

- [1] HRN U.C4.050, Projektiranje i građenje cesta, površinski čvorovi, Tehnički uvjeti, 1990.
- [2] Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama, Hrvatske ceste, Zagreb, 2014.
- [3] Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja sa spiralnim tokom kružnog kolnika na državnim cestama, Hrvatske ceste, Zagreb, 2014.
- [4] Plangleiche Knoten - Kreuzungen, T-Kreuzungen, FSV, RVS 03.05.12, Wien, 2007.
- [5] Plangleiche Knoten – Kreisverkehre, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), Wien, 2010.
- [6] Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren, FGSV (Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen), Köln, 2006.
- [7] Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen, RASt 06, 2006.
- [8] Dragčević, V.: Numerički model gibanja cestovnih vozila, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2015.
- [9] Vehicle tracking, <https://www.autodesk.com/products/vehicle-tracking/overview>, pristupljeno: 05.07.2017.
- [10] AutoTURN, <http://www.transoftsolutions.com/vehicle-swept-path/autoturn-select/>, pristupljeno: 05.07.2017.
- [11] Korlaet, Ž., Dragčević, V., Stančerić, I.: Designing Criteria of Acute Angle Four- Leg Intersection At-Grade, Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design, ur. Harwood, D.W.; Garcia, A., Valencia, Universitat Politecnica de Valencia, 2010.
- [12] Cestar, I.: Provoznost cestovnih raskrižja, Diplomski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [13] Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten, Bundesanstalt für Strassenwesen BAST, Schlussbericht, Bergisch Gladbach, 2008.
- [14] Direktiva 2002/7/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 18. veljače 2002. o izmjeni Direktive Vijeća 96/53/EZ o utvrđivanju najvećih dopuštenih dimenzija u unutarnjem i međunarodnom prometu te najveće dopuštene mase u međunarodnom prometu za određena cestovna vozila koja prometuju unutar Zajednice.
- [15] Maletin, M.: Planiranje i projektovnje saobraćajnica u gradovima, 2. izdanje, Orion art, 2005.
- [16] Bezina, Š., Stančerić, I., Ahac, S.: Design vehicles and roundabout safety - review of Croatian design guidelines, Transport infrastructure and systems, ur. Dell'acqua, G., Wegman, F., Rim, CRC Press - Taylor & Francis Group, pp. 237-244, 2017.

- [17] Bezina, Š., Stančerić, I., Ahac, S.: Swept path analysis on roundabouts for three-axle buses – review of the Croatian design guidelines, Road and Rail Infrastructure IV, Proceedings of the Conference CETRA 2016, ur. Stjepan Lakušić, Šibenik, Faculty of Civil Engineering University of Zagreb, 901-908, 2016.
- [18] Chan, S., Livingston, R.: Design vehicle's influence to the geometric design of turbo-roundabouts, Proceedings of 4th International Conference on Roundabouts, Transport reserch board, Seattle, 2014.
- [19] Stančerić, I., Korlaet, Ž., Dragčević, V.: Novi postupak oblikovanja četverokrakih kanaliziranih raskrižja, Građevinar, 69 (4), 2017), pp. 257-266, DOI: 10.14256/JCE.1927.2016
- [20] Džambas, T., Ahac, S., Dragčević, V.: Design of turbo roundabouts based on the rules of vehicle movement geometry, Journal of transportation engineering, 143 (2016) 7, pp. 1-10, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000850
- [21] Schleppekuren, Bemessungsfahrzeuge und Schleppekuren zur Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen, FGSV, Köln, 2012.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Hidrotehnika

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.03>

The impact of tree root systems on wastewater pipes

Dino Obradović

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering
kontakt: dobradovic@gfos.hr

Sažetak

Kanalizacijski sustav, uz sustav opskrbe pitkom vodom, je najvažniji dio imovine sustava javnog zdravlja nekog grada. Kada je pravilno održavan, kanalizacijski sustav odvodi otpadnu vodu iz kuća i zgrada prema uređaju za pročišćavanje te štiti zdravlje čovjeka. Također, drveće igra važnu ulogu u gradu budući da grad čini atraktivnim, zdravim i održivim. Drveće ima velikih prednosti poput poboljšanja kvalitete zraka, smanjenja oborinskog otjecanja te smanjenja radijacije topline s ulice. Međutim, korijenje drveća, ukoliko prodre u cijev, može prouzročiti začepljenja kanalizacijskih cijevi, pogotovo ako je posađeno na pogrešnom mjestu. Za početak, u radu će se prikazati šteta koju korijenje drveća može prouzročiti. Korijenje može potpuno blokirati ili smanjiti protok, prouzročiti izlivanje sadržaja kanalizacije ili oštetiti cijevi. Rad će prikazati neke od kemijskih i nekemijskih metoda kontrole/sprječavanja rasta korijenja u kanalizacijske cijevi. Također, dat će se preporuke kako izbjeći štete na cijevima prouzročene korijenjem drveća. Na kraju će se navesti vrste drveća koje se mogu saditi u blizini kanalizacijskih cijevi i one koje treba izbjegavati.

Ključne riječi: kanalizacijske cijevi, kontrola, korijenje drveća, šteta, utjecaj

The impact of tree root systems on wastewater pipes

Abstract

The sewer system is, second to the drinking water system, the most important part of the public health assets of a city. When it is operating properly, the sewage system is carrying wastewater away from homes and buildings into the wastewater treatment plant and protecting the public health. Also, trees play an essential role in making a city attractive, healthy, and sustainable. Trees provide significant benefits by improving air quality, reducing stormwater runoff, and reducing radiated heat from the streets. However, if tree roots enter into a wastewater pipe they can cause blockages in those pipes, especially if the trees are planted in the wrong place. First of all, this paper will show the damage that can be caused by tree roots. Tree roots can block or reduce flow, cause overflows of sewer content, or damage pipes. This paper will provide several chemical and non-chemical root growing control methods for sewer lines. Also, it will specify some recommendations on how to avoid damage to wastewater pipes caused by roots. Finally, it will provide some recommendations regarding the tree species suitable for planting near wastewater pipes and some trees that should be avoided.

Keywords: wastewater pipes, control, tree roots, damage, impact

1 Introduction

Good maintenance of the sewer system is a prerequisite for the rational management of this set of urban infrastructure, for good sanitary conditions in the urban environment and a good protection of the environment. Good maintenance of sewer system is one of the prerequisites for sustainable development and the standard of health of some of the urban environment; therefore it should be given serious attention [1]. Trees play an important role in maintaining the environment and preserving the natural beauty of a city [2]. Through the collective action of leaves and the anchoring and absorbing effects of roots, trees also contribute to soil stabilization, cleaner water and the recharge of groundwater [3]. Urban trees are well recognized as effective tools for mitigating urban runoff, but the specific role of the root system is largely unrecognized. Root systems aid in dispersal of stormwater into the soil by guiding stormwater along root channels, playing a primary role in base flow, aiding in water infiltration, and absorbing water [4]. However, if trees and plants are planted in the wrong place, their roots can find their way into wastewater pipes and cause sewage overflows. Sewage overflows can affect public health and the environment [2].

Urban soils are often disturbed, manipulated or handled in ways that change their properties and attendant characteristics. These modifications often adversely influence growing conditions [5]. Soil disturbance during installation creates pathways for roots to grow from the surface towards the pipe [6]. Roots grow where the resources of life are available [7]. Moisture and warm temperatures surrounding sewer pipes create excellent environments for root growth [8]. If a pipe is cooler than the surrounding soil, moisture will condense around it creating conditions conducive to root growth [9]. Backfill used during sewer construction may provide more favourable soil for root growth than the existing, surrounding undisturbed soils [8, 10].

Essentially, these root growth corridors contain favourable sized pores that can hold water and air, similar those found in topsoil. If pipes have been damaged and leak, then root growth will eventually exploit such regions [6]. Tree roots invade sewer lines because the pipes contain three elements necessary for tree growth: water, nutrients and oxygen. The degree of root invasion is dependent upon the condition of the sewer line, the type of tree and the soil conditions that exist in the root zone [11]. The roots of most trees cannot grow or survive if they are constantly submerged so roots are usually not a problem in sewers that are located below a permanent water table [12].

2 Pipe damage

Intrusion of roots into sewers is probably the most destructive problem encountered in a wastewater collection system. Root-related sewer problems include: sewer sto-

ppages and overflows, structural damage caused by growing roots, formation of septic pools behind root masses, reduction in hydraulic capacity and loss of self-scouring velocities, infiltration in areas where pipes are seasonally under a water table, and exfiltration of sewage into soils around cracked or separated joints [8].

Tree roots are opportunistic and grow where conditions are suitable [13]. Tree roots can enter services via leaking joints and blocked pipes, through deteriorated seals, where the joint has failed or been dislodged or through previous damage. It is rare for a tree root to crack into a properly installed and well-maintained pipe [14]. Cracks in pipes often occur over time and the failure of cement joints and rubber seals are quite common [15]. Older pipes have more root intrusions because of age and materials used [16].

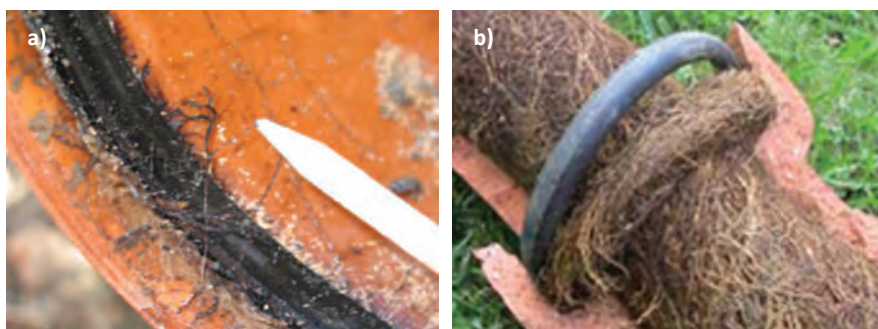


Figure 1. Roots in: a) modern PVC pipe [17]; b) old terracotta pipe – plugged pipe [18]

A pipe is comparatively easy to crack when it is not supported by soil. For the pipe to crack and fail a defect in the pipe needs to be present, or the outer portion of the pipe wall must be compressed. Where roots have a diameter greater than the outside diameter of the pipe, roots may produce sufficient force to dislodge a pipe. In addition, roots that enter through a joint between pipes can conceivably develop sufficient surface area to move the pipe a few millimetres until it fully beds in at the next joint [15].

3 Root control methods

A successful sewer line root control program will integrate a variety of root control methods. This includes non-chemical control methods such as planning and management during sewer line construction, physical control procedures, and mechanical root removal. Chemical control involves the use of certain herbicides [8].

3.1 Non-chemical root control methods

Although non-chemical methods generally do not provide the same level of results as chemical methods they have an important place in sewer line maintenance [8].

Cultural control of roots in sewers are routine management practices that can prevent roots from invading lines. Cultural controls must be implemented before roots become a problem [12]. Proper planning during sewer line design and construction is a practice that can prevent or minimize tree root invasion problems. Root problems are reduced by: carefully installing and inspecting sewer lines during construction to assure all joints are properly sealed, and controlling the selection of tree species and planting sites near sewer lines [8, 10, 12].

Physical control of sewer line roots involves isolating the environment of the sewer pipe from roots that could cause problems. Three examples of physical control include tree removal, sewer pipe replacement, and pipe relining [8, 10, 12].

Mechanical control is the most common method of root control and the most important non-chemical method. Mechanical control involves the use of tools or other devices which cut and remove roots from inside sewers [8, 10, 12]. Some examples of tools and devices for mechanical control are drill machines, rodding machines, jettors and winches. Mechanical control is often used in conjunction with chemical or other controls. For example, mechanical cleaning is used to prepare sewer lines for rehabilitation with pipe lining or regrouting [12].

3.2 Chemical root control methods

Root control products, like all chemicals used to kill plants, are herbicides [12]. In this process a root inhibitor chemical is applied to the reticulation sewer pipes considered to have tree roots present. The chemical historically has been applied via a “foaming” process but other processes have been trialed, e.g. spot spraying in conjunction with close circuit television (CCTV) equipment [19].

Many chemicals such as copper sulfate [20], dichlobenil, endothall, metam-sodium, etc. have been used for root control. Also, acid and basic compounds such as sulfamic or sulfuric acid and sodium or potassium hydroxide are commonly used as pour down products in residential settings [8].

Metam-sodium kills the plant roots, while dichlobenil is an effective growth inhibitor. They are applied together as a dry foam. At present, metam-sodium products for sewer usage may only be applied as a foam. The dryer phase of this foam is used to treat smaller pipe (less than 30 cm – 35 cm diameter). Wetter foam is used to treat larger pipe (more than 35 cm diameter). Specially designed foam generating equipment is required to produce and deliver the foam to the interior of the pipe [12].

4 Recommendations to prevent tree root damages

In landscape design, it is important to select tree species whose roots are less likely to enter sewage and drainage pipes. Correct selection of tree species will result in fewer pipe blockages, fewer tree removals, and less labor for root cutting. Although roots have been accused of causing much damage to pipes, in most instances searching roots entered through a crack. Therefore use PVC pipes because PVC pipes and their joints are more flexible; as a result, they are less likely to crack after soil settling [21]. If faster-growing species are desired, plan to replace trees every 8 to 10 years. When building new sewer lines or improving existing lines, consider landscaping plans and potential root intrusion from trees [11].

Table 1. Recommended trees for planting near sewer pipes [11]

Botanical name	Common name	Common name (in Croatian) [22]
<i>Acer ginnala</i>	Amur Maple	Kineski javor
<i>Acer palmatum</i>	Japanese Maple	Dlanolisni japanski javor
<i>Carpinus betulus</i>	European Hornbeam	Grab
<i>Cornus kousa</i>	Kousa Dogwood	Japanski drijen
<i>Fagus sylvatica</i>	European Beach	Europska bukva
<i>Lagerstroemia</i> spp.	Crapmyrtle	Jorgovan
<i>Malus</i> spp.	Crabapple	Jabuka

Table 2. Trees not recommended to plant (to avoid) near sewer pipes [2]

Botanical name	Common name	Common name (in Croatian) [22]
<i>Acer</i> spp.	Maples (mostly large)	Javor
<i>Fraxinus</i> spp.	Ashes (large)	Jasen
<i>Pinus</i> spp.	Pine	Bor
<i>Platanus</i> spp.	Plane Trees	Platana
<i>Prunus</i> spp.	Apricot, cherry, peach	Marelica, višnja, breskva
<i>Quercus</i> spp.	Oak	Hrast
<i>Salix</i> spp.	Willows	Vrba

5 Conclusions

The sewage system is indispensable in every city and it is very important to keep it functioning properly. In order for the sewage system to function properly, it is necessary to perform regular maintenance and take care of the damage and possible leaks in the sewer pipes. Nowadays, with the emphasis on the importance of sustainability, trees are gaining a more important role than they had before, because planting trees has many advantages. By planting trees, we are making the environment of the city more beautiful, reducing the amount of stormwater runoff, reducing surface heating in the city, improving air quality, and more. However, trees can damage sewage pipes with their root systems and it is therefore necessary to pay attention to the location where the trees will be planted and to the species of trees that will be planted. Roots can force their way into pipes to gain access to water and nutrients. In general, when planting trees we should be able to choose the right tree species with a less aggressive root system and make sure that we have planted it far enough from the sewer pipes and thus prevented root penetration into the sewer pipes. Of course, there are also various measures for removing roots from sewer pipes and for preventing their growth in the sewer pipes, however, prevention is highlighted as the most important measure.

References

- [1] Šperac, M., Moser, V., Stvorić, T.: Održavanje kanalizacijskog sustava uz primjenu GIS-a, e-gfos, (2012) 5, pp. 86-94.
- [2] Sydney Water: How you can help stop blockages, Tree planting and the wastewater system, <http://sydneywaternews.com.au/media/1201/tree-roots-fact-sheet.pdf>, pristupljeno: 22.06.2017.
- [3] Fazio, J.R.: How Trees can Retain Stormwater Runoff, Tree City USA Bulletin, No. 55, 2012.
- [4] Day, D.S., Wiseman, E.P., Dickinson, B.S., Harris, J.R.: Tree Root Ecology in the Urban Environment and Implications for a Sustainable Rhizosphere, *Arboriculture & Urban Forestry*, 36 (2010) 5, pp. 193-204.
- [5] Randrup, T.B., McPherson, E.G., Costello, L.R.: A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads, *Urban Ecosystems*, (2001) 5, pp. 209-225.
- [6] Pohls, O., Bailey, N.G., May, P.B.: Study of Root Invasion of Sewer Pipes and Potential Ameliorative Techniques, *Proceedings International Conference on Urban Horticulture*, Eds. R. Junge-Berberovic et al., pp. 113-121, 2004.
- [7] Perry, O.T.: Tree Roots: Facts and Fallacies, *Arnoldia*, 49 (1989), pp. 1-21.

- [8] Marer, J. P.: Sewer Line Root Control, University of California, Statewide Integrated Pest Management Project, Pesticide Education Program, 1996.
- [9] Brennan, G., Patch, D., Stevens, F.R.W.: Tree Roots and Underground Pipes, Arboriculture Research Note, Arboricultural Advisory and Information Service, 1997.
- [10] Duke, K., Jessen, E.: Sewer Line Chemical Root Control, 1995.
- [11] Ward, B., Clatterbuck, W.K.: Choosing Sewer Safer Trees?, <https://extension.tennessee.edu/publications/Documents/SP628.pdf>, pristupljeno: 22.06.2017.
- [12] Eds. Newton, B., Townsend, L.: Sewer root control, Category 16, UK Cooperative extension service, University of Kentucky-college of agriculture
- [13] Sivyer, D.: Roundtable: Sewer lines and trees, City Trees, pp. 24-27, 2006.
- [14] City of Sydney: Facts: Trees and their effects on drains and pipes, http://www.cityofsydney.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0004/213169/trees_water_sewer_fact_sheet.pdf, pristupljeno: 18.06.2017.
- [15] Hartley, M.: Tree Root Damage to Pipes, The Arborist Network, 2012.
- [16] Watson, W.G., Hewitt, A.M., Custic, M., Lo, M.: The Management of Tree Root Systems in Urban and Suburban Settings II: A Review of Strategies to Mitigate Human Impacts, Arboriculture & Urban Forestry, 40 (2014) 5, pp. 249-271.
- [17] Stål, O., Östberg, J.: Tree Roots and Sewers, <http://www.ikt.de/wp-content/uploads/2014/10/16-04-stal-tree-roots-and-sewers.pdf>, pristupljeno: 22.06.2017.
- [18] Western Water, Fact sheet, Tree Roots and sewer pipes: a growing concern, <http://www.westernwater.com.au/files/assets/public/documents/fact-sheets-and-brochures/tree-roots-and-sewer-pipes-a-growing-concern.pdf>, pristup: 19.06.2017.
- [19] Thomson, G.: Investigation of sewer blockages due to tree roots, 71st Annual Water Industry Engineers and Operators' Conference, pp. 71-78., 2008.
- [20] Mitchell, P.J., Schnelle, M.A.: Controlling Tree Roots in Sewer Lines with Cooper Sulfate, Current report, Oklahoma Cooperative Extension Service, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources
- [21] Svihra, P.: Ranking of trees according to damage of sewage pipes, Ornamental Northwest Archives, 11 (1987) 4, pp. 7.
- [22] Herrmann, W.: Voćnjak, ukrasni grmovi, travnjaci i drveće, Marjan tisak d.o.o., Split, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.13>

Kalibracija modela nadziranog učenja optimizacijom modelskih parametara

Jadran Berbić¹, Eva Ocvirk², Dijana Oskoruš¹, Tatjana Vujnović¹

¹ Državni hidrometeorološki zavod, Hrvatska

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

kontakt: jberbic@hotmail.com

Sažetak

Pretraživanje optimalnih parametara modela nadziranog učenja u svrhu hidrološkog modeliranja može biti zahtjevno u vremenskom smislu. Trajanje pretraživanja parametara ovisi o reprezentaciji modela, količini primjera za gradnju i kalibraciju modela, količini variranih parametara, rasponu i količini parametara unutar raspona, broju ispitanih kombinacija podjele skupa podataka na dijelove za gradnju i kalibraciju, prirodi modela za odabrane parametre. Ovisnost preciznosti modela o odabiru parametara smanjuje se s povećanjem količine primjera za gradnju modela te je u slučaju smanjene količine primjera potrebno više pažnje posvetiti odabiru parametara. U radu su prikazani rezultati pretraživanja parametara za tri modela nadziranog učenja različitih konfiguracija ulaznih varijabli. Pretraživanje je provedeno pomoću dva osnovna principa: odabirom najboljeg rješenja za odabrane raspone i količinu parametara te korištenjem optimizacijskog algoritma – simuliranog kaljenja.

Ključne riječi: nadzirano učenje, parametri modela, optimizacijski algoritmi

Calibration of supervised learning models using model parameters optimization algorithms

Abstract

Searching for optimal parameters of supervised learning models for the purpose of hydrological modelling tend to be timely exhaustive. Duration of parameter searching depend of model representation, number of instances for model training and calibration, number of varied parameters, range and number of parameters in the range, number of used combinations of dataset division in training and calibration part, model nature for chosen parameters. Dependence of model precisions of parameters choice is decreased with increase of number of instances for model training, and in the case of decreased number of instances more attention has to be put on parameter search. Results of parameter searching for three supervised models with different input variables configuration are shown in the paper. Searching is done by using two basic principles: choice of best solution for chosen ranges and number of parameters and by searching with optimization algorithm – simulated annealing.

Keywords: supervised learning, model parameters, optimization algorithms

1 Uvod

Predmetno istraživanje pripada domeni dugoročnih predviđanja u hidrologiji koristeći modele nadziranog učenja u svrhu predviđanja mjesečnog, sezonskog i dugoročnog planiranja. Dugoročno predviđanje nadziranim učenjem predstavlja izazov iz dva osnovna razloga: količina primjera (instanci) za gradnju modela značajno je manja nego u slučaju kratkoročnih predviđanja, izgradnjom odgovarajućih modela doprinosi se dugoročnom planiranju hidrotehničkih sustava. Naime, sa smanjenjem broja primjera smanjuje se vjerojatnost izgradnje kvalitetnog modela jer je nadzirano učenje zasnovano na pronalasku uzoraka u podacima. Planiranje hidrotehničkih sustava podrazumijeva procjenu mogućnosti zadovoljenja o sustavu ovisnih korisnika u dugoročnom smislu (tijekom trajanja sustava). Za takvu procjenu potrebna je informacija o vremenskoj dinamici dostupne količine vode te su modeli nadziranog učenja korišteni za predviđanje srednjeg mjesečnog dotoka. Svaka izgradnja hidroloških modela općenito se sastoji od dva dijela: odabira modelske konfiguracije – ulaznih varijabli te odabira modelskih parametara. Iz pregleda područja zaključeno je da se odabir konfiguracije (ulaznih varijabli) modela nadziranog učenja uglavnom provodi procesom pokušaja i pogreške. Složenost postupka odabira konfiguracije proizlazi iz značajne varijabilnosti u mogućnosti odabira konfiguracije, uz što postoji i značajna varijabilnost parametara modela. Konfiguracije modela korištene u radu dobivene su metodom pokušaja i pogreške uzimajući u obzir koreliranost ulaznih varijabli i predviđane varijable – srednjeg mjesečnog dotoka. Tri konfiguracije modela s ulaznim karakterističnim veličinama re-dom dotoka, oborine i temperature s jedne meterološke postaje te oborina i temperature s dvije postaje zapisane su u sljedećem obliku:

$$Q_{avm} = f(Q_{avm-1}, Q_{min-11}, Q_{min-1}, Q_{max-11}, Q_{yavm}, Q_{avmin-11}) \quad (1)$$

$$Q_{avm} = f(P_{1,avm-1}, P_{1,avm}, P_{1,acc-11}, P_{1,acc-2}, P_{1,acc-1}, P_{1,max-1}, P_{1,avacc-2}, T_{1,avm-11}, T_{1,avmin-2}) \quad (2)$$

$$Q_{avm} = f(P_{1,avm-1}, P_{1,avm}, P_{1,acc-11}, P_{1,acc-2}, P_{1,acc-1}, P_{1,avacc-2}, P_{1,avacc}, T_{1,avm-11}, T_{1,avmin-2}, P_{2,avm-11}, P_{2,avm}, P_{2,acc-11}, P_{2,acc-1}, P_{2,acc}, P_{2,max}, P_{2,yavm}, P_{2,avacc-11}, P_{2,avacc}, T_{2,avm-11}, T_{2,avm-2}, T_{2,avm}) \quad (3)$$

Tablica 1. Veličine i oznake korištenih ulaznih varijabli

Veličina	Q...protok [m ³ /s]	T...temperatura zraka [°C]	P...oborina [mm]
Oznaka	avm, min, max, yavm, avmin, avmax	avm, min, max, yavm, avmin, avmax	avm, acc, max, yavm, avacc, avmax
avm, min, max - srednja, minimalna i maksimalna mjesečna vrijednost; yavm, avmin, avmax - srednja, minimalna i maksimalna mjesečna vrijednost usrednjena po svim godinama; acc - akumulirana mjesečna vrijednost; avacc - akumulirana mjesečna vrijednost usrednjena po svim godinama			

Indeks 1 odnosi se na podatke s glavne meteorološke postaje Knin, a indeks 2 na temperaturu s klimatološke postaje Sinj i oborinu s kišomjerne postaje Vinalić. Dotoci su s hidrološke postaje Vinalić 1. Modeli (reprezentacije) nadziranog učenja ovdje su neuronske mreže (eng. *artificial neural network* - ANN), metoda potpornih vektora (eng. *support vector machine* - SVM) i metoda najbližih susjeda (eng. *nearest neighbors method* - NNM). NNM, iako ima dosta varijacija u izboru tipa i parametara modela, jednostavniji je model od preostala dva, ali upućuje na to kakva se preciznost može očekivati kod druga dva modela, jer su uz pažljiv odabir parametara druga dva modela obično preciznija. Opis modela i značenja njihovih parametara može se naći u literaturi o strojnom učenju [1-5].

1.1 Metodologija

Modelima nadziranog učenja se na temelju zadanih podataka (ulaznih i izlaznih varijabli) aproksimira funkcija kojom se izvode predviđanja na neviđenim primjerima. Iz same definicije jasno je da na kvalitetu modela utječe duljina korištene vremenske serije (količina instanci) za proces izgradnje, kalibracije i verifikacije modela. Radi procjene utjecaja duljine niza na preciznost modela te dolaska do odgovora na pitanje koje su minimalne duljine niza potrebne za izgradnju modela zadovoljavajuće točnosti, građeni su modeli nadziranog učenja na vremenskim serijama s istim varijablama, ali različite duljine. Korištene duljine niza su od 10 do 65, 67 i 70 godina, ovisno o podacima na raspolaganju kod pojedine konfiguracije modela. Za svaku konfiguraciju modela i korištenu duljinu niza, optimizirani su parametri modela ANN, SVM i NNM. Podaci koji nisu korišteni u procesu izgradnja-kalibracija-verifikacija, odnosno razlika ukupne količine podataka i korištene duljine niza, iskorištena je za proces dodatne verifikacije modela. Primjerice, ako je povijesna duljina niza jednaka 65 godina, a prvih 40 godina korišteno je za proces izgradnja-kalibracija-verifikacija modela (kronološki podijeljeno na 60, 20 i 20 % podataka), ostalih 25 godina iskorišteno je za dodatnu verifikaciju modela. Na taj način ispitana je mogućnost uporabe modela za postupak dugoročnog planiranja kod konfiguracija koje koriste oborinu i temperaturu kao ulazne varijable. U postupku pretraživanja optimalnih parametara korišteni su dijelovi podataka za izgradnju i kalibraciju modela, a maksimizirao se koeficijent determinacije R^2 . R^2 je mjera izglednosti predviđanja modelom, načelno u rasponu od 0,0 do 1,0, iako prema nekim definicijama može biti i manji od 0,0 jer model može predviđati proizvoljno loše [3]. Savršeno precizno predviđanje karakterizira vrijednost 1,0 [6]. Kod ANN-a za aktivacijske funkcije tangens hiperbolički (eng. *tanh*) i rektifikacijsku funkciju (eng. *relu*), uz zadani konstantni moment učenja 0,9, variran je broj čvorova u skrivenom sloju HLS, početni intenzitet učenja LRI i tolerancija greške TOL. Kod SVM-a za funkcije kernela – radialno zasnovanu funkciju (eng. *rbf*), polinom i sigmoidnu funkciju, varirani su parametar razmjene C, širina margine ϵ i parametar kernela γ . Kod NNM-a za način

raspodjele težinskih koeficijenata po susjedima – jednoliki i prema udaljenostima susjeda, variran je broj susjeda nn , algoritmi izračuna težinskih koeficijenata (eng. *Brute*, *Ball tree*, *Kd tree*, *Auto*) i potencija Minkowskog za izračun udaljenosti p . U poglavlju 2. dani su rezultati pretraživanja provedenog na temelju ugrađenih funkcija u Pythonovoj knjižnici *sklearn*. Za zadanu konfiguraciju modela, raspon i količinu parametara u tom rasponu, rezultat su parametri modela s najvećom vrijednošću R^2 . Pri pretraživanju se cijeli dio vremenske serije za gradnju i kalibraciju modela po nasumičnom izboru dijeli na ta dva dijela, 75 % za gradnju, a 25 % za kalibraciju. U konfiguraciji s dotokom korištena je jedna takva podjela u svakom pretraživanju, a u ostale dvije konfiguracije tri. U poglavlju 3. pretraživanje je provedeno programskim rješenjem simuliranog kaljenja. Vremenska serija dijeljena je na dijelove za gradnju i kalibraciju na isti način kao u prethodnom slučaju. Zbog ograničenosti prostora, dan je osvrt samo na modele s duljinom niza od 40 godina, optimalne po preciznosti i veličini dijela za dodatnu verifikaciju kod svih konfiguracija i modela.

2 Detaljno pretraživanje odabranih raspona parametara

U tablici 2. prikazani su rasponi korišteni za pretraživanje za sve konfiguracije. Kod ANN-a pretraživan je broj čvorova s korakom 3, a u svakoj konfiguraciji pretraženo je ukupno 20 različitih vrijednosti LRI te 20 vrijednosti TOL . Kod SVM-a je za svaki parametar pretraženo po 30 vrijednosti, osim kod konfiguracije 2 gdje je pretraženo 35 vrijednosti parametra ϵ . Tijekom analize odabir raspona parametara je mijenjan ovisno o tome u kojim rasponima se nalaze najbolji modeli iz prethodno korištene duljine niza.

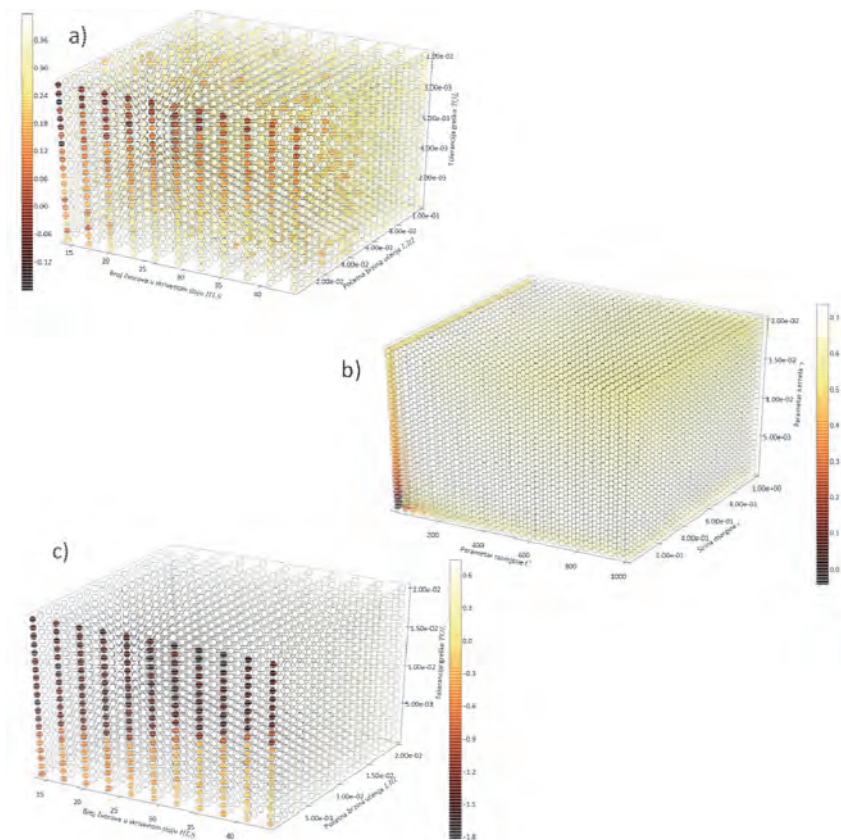
Tablica 2. Korišteni rasponi parametara modela za konfiguracije (1-3)

Konf.	ANN			SVM		NNM		
	HLS	LRI	TOL	C	ϵ	γ	nn	p
(1)	14-47	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-2}$	5,0-750,0	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^1$	$10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$	2-30	1-20
(2)	14-47	$10^{-5} - 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6} - 10^{-2}$	1,0-1000,0	$10^{-5} - 10^1$	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$		
(3)	14-44	$10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6} - 10^{-2}$	1,0-1000,0	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^1$	$10^{-5} - 8 \cdot 10^{-3}$		

Postignute vrijednosti R^2 i pripadni parametri prikazani su u tablici 3., a grafovi koji prikazuju preciznost u ovisnosti o parametrima predloženi su na slici 1.

Tablica 3. Optimalni parametri modela za konfiguracije 1-3

Konf.	ANN				SVM				NNM				R ² [1]		
	Akt. f.	HLS	LRI	TOL	Kernel	C	ϵ	γ	Tež. k.	nn	Alg.	ρ	ANN	SVM	NNM
(1)	<i>relu</i>	20	0,032	0,0026	<i>rbf</i>	698,6	6,34	0,008	udalj.	4	<i>Ball tree</i>	8	0,42	0,37	0,37
(2)	<i>tanh</i>	14	0,0026	0,0026	<i>rbf</i>	35,4	0,559	0,019	udalj.	7	<i>Ball tree</i>	3	0,73	0,74	0,64
(3)	<i>relu</i>	23	0,0126	0,0116	<i>rbf</i>	35,4	0,07	0,0077	jedn.	4	<i>Ball tree</i>	2	0,74	0,73	0,69



Slika 1. Preciznost modela za zadane raspone parametara: a) ANN za konfiguraciju 1, b) SVM za konfiguraciju 2, c) ANN za konfiguraciju 3

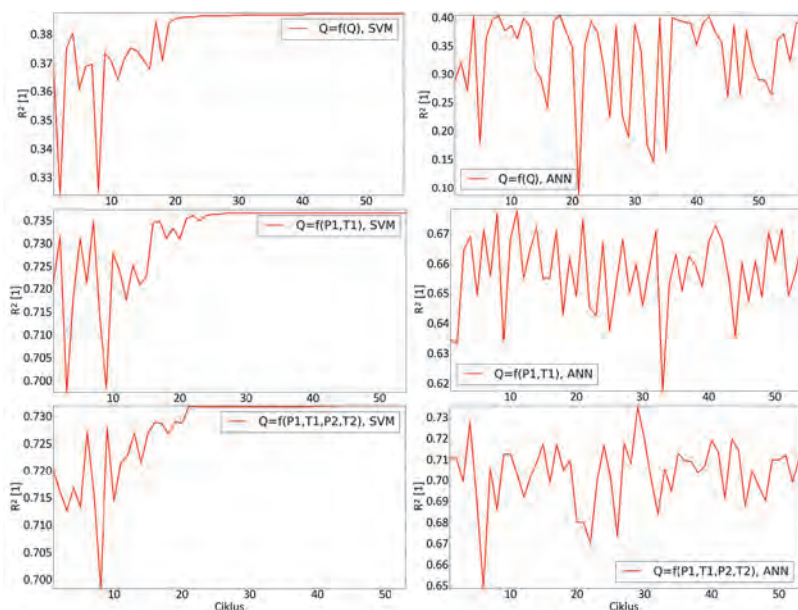
3 Pristup primjenom simuliranog kaljenja

Simulirano kaljenje moderni je optimizacijski algoritam koji primjenjuje analogiju između simulacije termalnog kaljenja i pretraživanja optimalnog rješenja. Princip koji se koristi postupno je hlađenje metala kojim se teži postići minimum unutarnje energije kristalizacijom atoma. Za više informacija čitatelja se upućuje na literaturu [7]. Programsko rješenje napisano je u okruženju Python. Algoritam za zadanu početnu

količinu proizvoljno odabranih parametara u zadanim rasponima pronalazi prosjek vrijednosti ciljne funkcije (R^2) skaliran na odgovarajuće vrijednosti temperature (0 K - 400 K). Za zadani broj iteracija u blizini generiranih slučajnih parametara modela pronalazi nove skupove parametara modela. Ako je ciljna vrijednost manja od one iz prethodne iteracije, ona se prihvaća, a ako je veća, prihvaća se s nasumično generiranom vjerojatnošću. Dakle, problem je po definiciji minimizacijski, ali je kroz parametar temperature preoblikovan u maksimizacijski, tj. smanjenjem temperature R^2 se povećava. Generiranje novih parametara prestaje nakon zadanog broja iteracija, a pretraživanje kreće u novi ciklus te se temperatura smanjuje po unaprijed zadanom pravilu. Pretraga prestaje nakon što se temperatura smanji na zadanu maksimalnu vrijednost ili pri maksimalno dopuštenom broju ciklusa. Pretraživanje parametara provedeno je u istom rasponu kao i detaljno pretraživanje parametara.

Tablica 4. Optimalni parametri modela dobiveni simuliranim kaljenjem

Konfiguracija	ANN				SVM				R^2 [1]	
	Akt.f.	HLS	LRI	TOL	Kernel	C	ϵ	γ	ANN	SVM
(1)	<i>relu</i>	28	0,0018	0,0054	<i>rbf</i>	653,0	6,134	0,0050	0,40	0,39
(2)	<i>tanh</i>	45	0,0006	0,0035	<i>rbf</i>	31,5	0,925	0,0166	0,70	0,74
(3)	<i>relu</i>	41	0,0043	0,0076	<i>rbf</i>	970,2	4,662	0,0028	0,67	0,73



Slika 2. Pretraživanje parametara modela ANN (desno) i SVM (lijevo) korištenjem simuliranog kaljenja za konfiguracije 1-3 (odozgo prema dolje)

4 Zaključak

Metodologija pretraživanja parametara i konfiguracije hidroloških modela nadziranim učenjem nije u potpunosti razjašnjena. Vrlo je širok raspon odabira konfiguracije i parametara. Primjećuje se da je kod dobro odabrane konfiguracije (2 i 3) znatno širi raspon parametara za koje je moguće dobiti modele zadovoljavajuće preciznosti (s koeficijentom determinacije 0,7 - 0,8). Korištenjem optimizacijskog algoritma simuliranog kaljenja kod SVM-a pronađeni su parametri podjednake točnosti, ali uz kraće trajanje pretrage (8,3; 13,9; 10,7 min umjesto 5,4; 47,3; 37,9 min redom za konfiguracije 1; 2; 3). Također, kod SVM-a je algoritam konvergirao, dok se kod ANN-a primjećuje smanjenje oscilacija s povećanjem broja ciklusa, ali nema konvergencije. Time i završni odabir parametara nije optimalan, a preciznost je manja nego kod detaljnog pretraživanja. ANN s većim vrijednostima *LRI* može biti nestabilna (zbog zaobilaženja globalnog minimuma u samoj gradnji modela) te bi trebalo težiti nižim vrijednostima *LRI*, a što opet povećava vrijeme trajanja pretrage jer izgradnja ANN s manjim *LRI* dulje traje. Vrijeme kod pretraživanja simuliranim kaljenjem za ANN trajalo je dulje, redom 330,4; 994,2; 655,8 min umjesto 26,5; 154,6; 461,7. Stoga, automatizacija detaljnog pretraživanja konfiguracije uz pretraživanje optimalnih parametara simuliranim kaljenjem na modelu SVM može uštedjeti vrijeme izgradnje modela nadziranog učenja i pridonijeti izgradnji modela zadovoljavajuće točnosti. Također, može se pokazati da primjena simuliranog kaljenja na SVM-u s vremenskom serijom podijeljenom kronološki na dijelove za gradnju i kalibraciju traje još kraće (oko 1 min - 2 min). Promjenom parametara simuliranog kaljenja te raspona parametara ANN-a može se doći u područje stabilnijih rješenja, ali to neće značajno utjecati na smanjenje trajanja pretraživanja.

Literatura

- [1] Smola, A.J., Schölkopf, B.: A tutorial on support vector regression, *Statistics and Computing*, 14 (2004), pp. 199-222.
- [2] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay M.É.: Scikit-learn: machine learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 12 (2011), pp. 2825-2830
- [3] Python: Scikit-learn user guide, release 0.17, 2015.
- [4] Mitchell, T.M.: *Machine learning*, 1. izdanje, McGraw Hill Inc., New York, 1997.
- [5] Russel, R., Norvig, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3. izdanje, Prentice Hall,

2010.

- [6] Marsland, S.: Machine Learning, An Algorithmic Perspective, 2. izdanje, Chapman & Hall, 2015.
- [7] Rao, S.S.: Engineering Optimization, 4. Izdanje, John Wiley and Sons, 2009.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.24>

Ekspperimentalno i numeričko modeliranje tečenja u krškim vodonosnicima

Luka Malenica, Hrvoje Gotovac, Grgo Kamber

Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

kontakt: luka.malenica@gradst.hr

Sažetak

Tečenje vode u kršu predstavlja kompleksan hidraulički sustav zbog čega se većina postojećih numeričkih modela bazira na pojednostavljenim matematičkim modelima. U ovom radu se prikazuje razvoj novog numeričkog modela koji bi trebao predstavljati iskorak prema realnijem modeliranju tečenja u kršu. Poseban problem s kompleksnim 3D modelima tečenja u kršu je njihova verifikacija zbog nepoznatih parametara vodonosnika, posebno pozicije, oblika i dimenzija krških kanala. Stoga se u ovom radu prikazuje mogućnost verifikacije numeričkog modela u laboratorijskim uvjetima na posebno izgrađenom fizikalnom modelu krškog vodonosnika.

Ključne riječi: krš, tečenje podzemnih voda, fizikalni model, numerički model

Physical and numerical flow modeling in karst aquifers

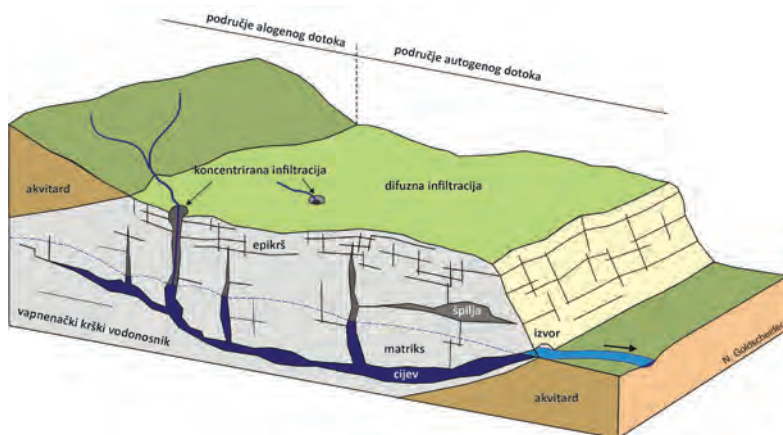
Abstract

Because groundwater flow in karst is very complex hydraulic system, most of existing models are based on simplified mathematical models. This work represents attempt toward more reliable modeling of flow in karst. Particular difficulty with complex 3-D karst flow models is its verification due to lack of input data such as parameters of aquifer, especially position, shape and dimensions of conduit network. Therefore, this work shows possibility to verify karst flow models under the laboratory controlled conditions on specially build karst physical model.

Keywords: karst, groundwater flow, physical model, numerical model

1 Uvod

Općenito od 20 % do 25 % svjetske populacije koristi vodu iz krških vodonosnika [1]. Osim dostupnih količina, vrlo je bitna kvaliteta vode. Kako voda u kršu zbog postojanja mreže krških kanala teče vrlo brzo prema izvorima, krški vodonosnici su posebno ranjivi na širenje onečišćenja. Stoga numeričko modeliranje tečenja u kršu nije samo izazovno već i potrebno [2].



Slika 1. Primjer krškog vodonosnika [3]

Slika 1. prikazuje konceptualni model krškog vodonosnika [3]. Na slici je prikazan kanalski sustav u kojem se uglavnom odvija turbulentni tok koji, ovisno o trenutačnim hidrodinamičkim uvjetima, može biti sa slobodnim vodnim licem ili pod tlakom. Drugi dio toka se odvija kroz sustav manjih pukotina i pora koji zajedno nazivamo matricom i gdje se u pravilu odvija laminarno, difuzno strujanje (procjeđivanje). Najveći dio akumulirane vode se skladišti u samoj matrici dok se glavni dio protoka prema izvoru odvija kroz sustav kanala. Veza između kanala i matrice postoji u oba smjera. Tijekom kišnih razdoblja jedan dio oborina direktno ponire te jako brzo povećava tlakove i protoke u kanalima, dok se drugi dio oborina infiltrira kroz epikrš u nesaturiranu zonu i akumulira se u matrici u kojoj su promjene znatno sporije nego u kanalu. Naglo povećanje tlakova u kanalu dovodi do toga da kanal jedno vrijeme prihranjuje matricu. Nakon prestanka oborina, tlakovi i protoci u kanalu brzo opadaju te kanal počinje funkcionirati kao dren podzemne vode akumulirane u matrici i kavernama.

Kod modeliranja krša možemo definirati dva glavna problema: teoretski i praktični. Teoretski problem je taj što krš predstavlja kompleksan hidraulički sustav koji se ne može jednostavno matematički opisati. Također tečenje u kanalima i matrici fizikalno je dosta različito, što se prenosi na matematičke jednadžbe koje su različitog karaktera i čija se rješenja mijenjaju na različitim vremenskim i prostornim skalama što stvara

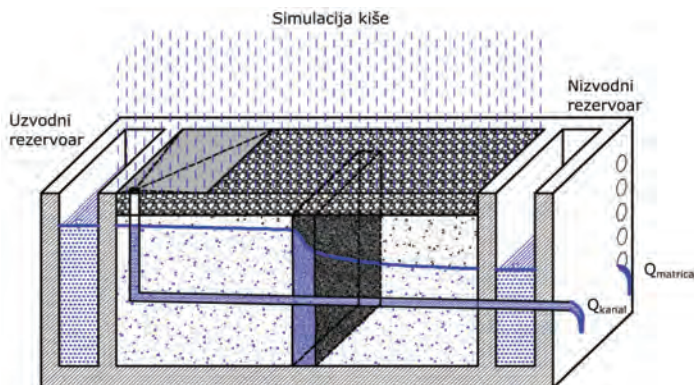
ozbiljne probleme za stvaranje robusnih numeričkih modela.

Praktični problem je taj što je kod realnih krških vodonosnika dosta podataka nepoznato, tj. ulazni podatci kao što su geometrija i pozicija kanala, parametri tla, stvarna raspodjela kiše, itd. uvijek su ograničeni i često nedovoljni za realne simulacije.

U ovom radu je težište na teoretskom problemu, odnosno na pitanju ako su poznati svi ulazni podatci, kako realno opisati takav složeni sustav te kako verificirati dobivene rezultate. Zbog toga je odlučeno izgraditi trodimenzionalni fizikalni model koji ujedno predstavlja i konceptualni model jednog krškog vodonosnika. Stoga prvi korak prema realnijem modeliranju tečenja u stvarnim krškim vodonosnicima jest razvoj novog numeričkog modela te njegova verifikacija s eksperimentalnim rezultatima.

Fizikalni model

Opisat će se eksperimentalni model koji je shematski prikazan na slici 2. Model se nalazi u dvorištu laboratorija Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Žrnovnici.



Slika 2. Shema fizikalnog modela za modeliranje tečenja u kršu

Model se sastoji od betonske konstrukcije s dva spremnika (uzvodni i nizvodni) u kojima se određuju razine vode, tj. piezometarske razine kao rubni uvjeti. Između spremnika se nalazi heterogeni porozni medij (*matrica*) ispunjen uglavnom kvarcnim pijeskom različitih frakcija, a na vrhu se nalazi 25 cm šljunka (*epikrš*). Unutar poroznog medija postavljene su perforirane plastične cijevi (*krški kanali*) s ugrađenim vertikalnim cijevima (*ponorima*). Na vrhu bazena ugrađene su prskalice za simulaciju oborina. Pomoću posebno napravljenih oštrobričnih trokutnih preljeva, tijekom eksperimenta se mjere protoci iz matrice (što u praksi gotovo nikad nije moguće) i na kraju krških kanala (*izvori*). Također, unutar samog modela ugrađeni su piezometri te se uz još određen broj pomičnih tlačnih senzora mjere tlakovi u poroznoj matrici u približno 50 točaka.

Iako navedeni fizikalni model nije potpuno realan model stvarnog krškog vodonosnika, činjenica da se u praksi isti matematički modeli koriste za opisivanje tečenja u kršu

i u jednom ovakvom sustavu čini ga dosta atraktivnim i otvara mogućnost provjere ispravnosti numeričkih modela krša.



Slika 3. Fotografija fizikalnog modela

2 Matematički model tečenja u kršu

2.1 Tečenje u poroznoj matrici

Tečenje u varijabilno saturiranim poroznim sredinama može se opisati jednadžbom kontinuiteta nestišljivog strujanja i Darcyevim zakonom. Kombinirajući navedene dvije jednadžbe dolazi se do mješovite formulacije Richardsove jednadžbe koja glasi [4]:

$$\frac{\partial \theta(h_m)}{\partial t} = \nabla \cdot (K(h_m) \nabla h_m) + q \quad (1)$$

gdje je θ [L^3/L^3] obujamska vlažnost tla, h_m [L] piezometarska razina u matrici, K [L/T] tenzor hidrauličke propusnosti i q [1/T] je izvorni član koji može služiti i za uspostavljanje veze između matrice i kanala. Iako konstitutivni odnosi [4] između θ i h_m omogućuju da se jednadžba (1) napiše kao funkcija samo jedne nepoznanice (θ ili h_m), numerički je najpovoljnije aproksimirati direktno izraz (1). Linearizacija obujamske vlažnosti θ preko piezometarske razine h_m omogućuje da je nepoznata varijabla pri rješavanju problema samo piezometarska razina h_m .

Zbog izrazite nelinearnosti parametara tla u nesaturiranoj zoni, navedeni problem često zahtijeva vrlo finu prostornu i vremensku diskretizaciju, kao i određene tehnike stabilizacije u svrhu osiguranja konvergencije numeričkog postupka.

2.2 Tečenje u krškim kanalima

Tečenje u kanalima zapravo je potpuno opisano sustavom Navier-Stokesovih jednadžbi [5]. Međutim, kako je rješavanje punih 3D jednadžbi računalno veoma zahtjevno i kako mogućnost strujanja sa slobodnim vodnim licem dovodi do problema modeliranja ili višefaznog tečenja (vode i zraka) ili nepoznate geometrije vodnog lica (geometrijska nelinearnost), tako i problem postaje još zahtjevniji. Da bi razvijeni model bio primjenjiv (na skali realnog krškog vodonosnika), potrebno je pojednostavniti matematički model tečenja u kanalu. Jedna od mogućnosti je koristiti 1D Saint-Venantove jednadžbe koje opisuju tečenje u otvorenim koritima, ali uz manje modifikacije mogu aproksimirati i tečenje u cijevima pod tlakom. Sustav Saint-Venantovih jednadžbi je definiran jednadžbom kontinuiteta

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(Au)}{\partial x} = q \quad (2)$$

te jednadžbom očuvanja količine gibanja

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h_c}{\partial x} + g(S_f - S) = 0 \quad (3)$$

gdje su: A [L^2] površina poprečnog presjeka toka, $u = Q/A$ [L/T] je srednja brzina u presjeku, q [L^2/T] izvorni član, h_c [L] dubina vode u proračunskom presjeku kanala kod tečenja sa slobodnim vodnim licem ili piezometarska visina kod tečenja pod tlakom, S_f [L/L] nagib energetske linije, a S [L/L] nagiba dna kanala.

2.3 Interakcija između matrice i krških kanala

Dva najčešća pristupa u literaturi za uspostavljanje veze između matrice i kanala je jednakost tlakova te izraz za fluks na granici između dviju domena [2]. Prvi pristup uglavnom se primjenjuje kada su obje domene potpuno saturirane, te stoga nije pogodan za postavljene konceptualni model. Kod drugog pristupa volumetrijski protok između različitih domena definira se izrazom

$$Q_{ex} = \alpha(h_c - h_M) \quad (4)$$

gdje su h_c i h_M piezometarske visine u kanalu i matrici, a α je parametar koji nema svoje potpuno fizikalno značenje, te se u pravilu kalibrira. Uspostavljanje fizikalno relevantnije veze između matrice i kanala zasigurno bi bio iskorak prema realnijem modeliranju krških vodonosnika.

3 Numerički model tečenja u kršu

Numerički model korišten za diskretizaciju navedenog matematičkog modela bazira se na integralnoj formulaciji konačnih volumena (direktnom zadovoljenju zakona održanja na diskretnim konačnim volumenima) te Fup baznim funkcijama. Fup bazne funkcije ubrajaju se u klasu atomskih baznih funkcija i mogu se definirati kao beskonačno derivabilne krivulje [6]. Rješenja u matrici i kanalu se opisuju umnoškom nepoznatih koeficijenata i baznih funkcija:

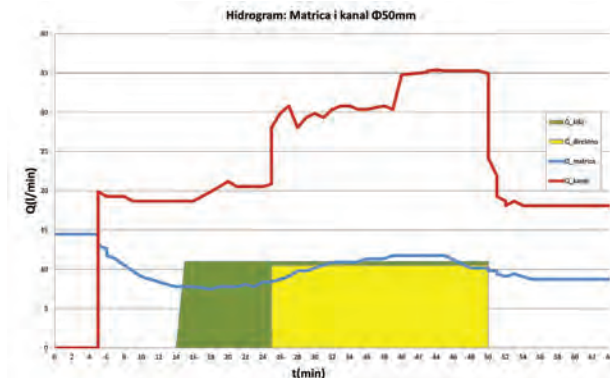
$$h_M(x, y, z) = \sum_j \alpha_j \cdot \varphi_j(x, y, z) \quad (5)$$

$$h_c(l) = \sum_j \beta_k \cdot \Phi_k(l) \quad (6)$$

3D bazne funkcije φ_j opisuju rješenje u porznoj matrici, a 1D bazne funkcije β_k u krškim kanalima, gdje su α_j i β_k Fup koeficijenti koji definiraju rješenje u matrici i kanalima. Opisani pristup zasnovan na Fup baznim funkcijama omogućuje aproksimaciju višeg reda, te aproksimativna rješenja definirana kao kontinuirane funkcije s kontinuiranim i glatkim derivacijama.

4 Rezultati

U ovom radu se daje primjer hidrograma izmjenenog na fizikalnom modelu (slika 4). Mjerenja počinju od postignutog stacionarnog stanja u matrici za zatvoreni završetak krškog kanala (izvor). Približno nakon 5 minuta od početka mjerenja kanal se otvara. Protok u kanalu (Q_{kanal}) vrlo brzo raste dok protok u matrici ($Q_{matrica}$) opada (kanal funkcionira kao dren podzemne vode). U 14. minuti od početka eksperimenta počinje simulacija kiše ($Q_{kiša}$), a u 25. minuti se uključuje direktno prihranjivanje vode ($Q_{direktno}$) kroz ponor u kanal. U 50. minuti se prekida kiša i direktno prihranjivanje te se protoci nakon određenog vremena vraćaju na stanje prije kiše.



Slika 4. Rezultati fizikalnog modela: hidrogram

5 Zaključak

U ovom radu je opisan fizikalni i numerički model za tečenje vode u kršu. Osim manjeg broja dvodimenzionalnih modela, ovakav tip eksperimentalnog modela u literaturi nije pronađen, pa stoga nudi mogućnost za provjeru ispravnosti postojećih numeričkih modela krša. Također opisani numerički model uzima potpunije (fizikalnije) jednadžbe od postojećih numeričkih modela u kršu te bi zajedno s novom numeričkom metodom, koja se razvija za potrebe ovog modela, trebao predstavljati iskorak prema boljemu razumijevanju i realnijem modeliranju svih procesa vezanih uz tečenje vode u krškim vodonosnicima.

Zahvala

Zahvaljujemo što je ovo istraživanje financirana Hrvatska zaklada za znanost kroz znanstveni projekt "Modeliranje tečenja u krškim vodonosnicima"; UIP-2013-11-8103.

Literatura

- [1] Ford, D., Williams, P.: Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [2] De Rooij R.: Towards improved numerical modeling of karst aquifers: coupling turbulent conduit flow and laminar matrix flow under variably saturated conditions, University of Neuchatel, 2008.
- [3] International Association of Hydrogeologist, link (http://karst.iah.org/karst_hydrogeology.html), pristupljeno: 15.07.2017.
- [4] Celia, M.A., Bouloutas, E.T., Zarba, R L.: A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation, Water Resources Research. 1990, <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01483>
- [5] Batchelor, G.K., Young, A.D.: An Introduction to Fluid Mechanics, Journal of Applied Mechanics, 1968.
- [6] Gotovac, H., Andričević, R., Gotovac, B.: Multi-resolution adaptive modeling of groundwater flow and transport problems. Adv Water Resour, 30 (2007) 5, pp.1105–26.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.32>

Hidrodinamički model strujanja vodonosnika “Bokanjac – Poličnik” - kalibracija

Željko Šreng¹, Goran Lončar²

¹ Sveučilište u Osijeku, Građevinski fakultet

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

kontakt: zsreng@gfos.hr

Sažetak

Za simulaciju toka podzemnih voda u kršu primjenjuju se razni tipovi determinističkih modela, kao što su model ekvivalentnog poroznog medija (eng. *Single-Continuum Porous – Equivalent - SCPE*), hibridni model (HM), diskretni model s jednom ili više pukotina. Najjednostavniji pristup od svih je primjena SCPE modela koji se bazira na pretpostavci laminarnog toka te konstantne temperature, gustoće i viskoznosti vode, gdje je tok vođen potencijalnom energijom, tj. gradijentom tlaka. Cilj ovog rada je primijeniti SCPE pristup unutar numeričkog modela Modflow kako bi se simuliralo otjecanje podzemnih voda u krškom vodonosniku “Bokanjac – Poličnik” te dobio uvid u raspodjelu ekvipotencijala i strujnog polja unutar vodonosnika. Sliv “Bokanjac – Poličnik” predstavljen je ortogonalnom mrežom s ćelijama dimenzija 200 m x 200 m u horizontalnoj ravnini te s dva sloja u vertikalnom smjeru. Kalibracija se odnosi na 29. siječnja do 30. lipnja 1967. godine (153 dana). Korišteni su podaci dnevnih oborina s ombrografske stanice smještene unutar analiziranog područja. Simulacija je pokazala da se definiranjem pukotina na način da im se pridruže velike vrijednosti koeficijenata propusnosti mogu uspješno opisati pojave unutar vodonosnika, bez upotrebe sofisticiranijih modela kao što je hibridni model (HM).

Ključne riječi: *krški vodonosnik, strujanje, Modflow, SCPE*

Hydrodynamic model of groundwater flow in “Bokanjac - Poličnik” aquifer - calibration

Abstract

Deterministic models such as Single – continuum porous – equivalent (SCPE), the hybrid model (HM), the discrete single fracture or pipe set model (DSFS), and the discrete multiple fracture or pipe set model (DMFS) have been used in simulating groundwater flow in karst aquifer. The simplest one, the SCPE, is based on laminar flow assumption with constant temperature, density and viscosity of water where flow can be simulated with the potential flow equation of fluid mechanics. The goal of this paper is to apply SCPE approach within numerical model Modflow in order to simulate groundwater flow in karst aquifer “Bokanjac – Poličnik” and to get insight into spatial distribution of equipotentials and flow field. Catchment “Bokanjac – Poličnik” is represented by an orthogonal network with grid spacing of 200x200 m in horizontal plane and with two layers in vertical direction. Calibration period covers period from 29.1.1967 to 30.6.1967 (153 days). Data from nearby ombrographic station were used. Simulation shows that defining of karst fractures with very large hydraulic conductivity cells in an SCPE approach can successfully describe flow regime within karst aquifer.

Keywords: *karst aquifer, groundwater flow, Modflow, SCPE*

1 Uvod

Za simulaciju toka podzemnih voda u kršu primjenjuju se razni tipovi determinističkih modela, kao što su model ekvivalentnog poroznog medija (eng. *Single-Continuum Porous – Equivalent*, SCPE), hibridni model (HM), diskretni model s jednom ili više pukotina. Najjednostavniji pristup od svih je primjena SCPE modela koji se bazira na pretpostavci laminarnog toka te konstantne temperature, gustoće i viskoznosti vode, gdje je tok vođen potencijalnom energijom, tj. gradijentom tlaka. Primjena SCPE modela u analiziranom području moguća je ako je područje istraživanja mnogo veće od reda heterogenosti geološke strukture unutar vodonosnika. Primjena SCPE pristupa pokazala se uspješnom na mjestima gdje se model mogao kalibrirati uz pomoć parametara toka i razina vode [1-5]. Osnovna ideja je da se ćelijama unutar modela kroz koje prolaze veće pukotine pridruže mnogo veće vrijednosti hidrauličke vodljivosti u odnosu na okolne ćelije. Okolne ćelije, tzv. matriks, predstavljaju slabo propusnu kršku stijenu. Zna li se točan raspored pukotina i njihov smjer pružanja i konačni model bit će točniji i pokazivat će vjerodostojnije rezultate. Takve informacije iznimno je teško prikupiti te iziskuju skupa terenska istraživanja, a ako nisu dostupne istraživač je prisiljen poduzeti složen proces kalibracije i primjenu znanja iz ostalih istraživanja. Cilj je ovog rada primijeniti SCPE pristup unutar numeričkog modela Modflow kako bi se simuliralo otjecanje podzemnih voda u krškom vodonosniku "Bokanjac – Poličnik", tj. kako bi se napravila kalibracija modela koji će poslužiti u nastavku istraživanja s konačnim ciljem definiranja potencijalnih mjesta onečišćenja i režima pronosa onečišćivača kroz krški vodonosnik.

2 Područje istraživanja

Područje istraživanja smješteno je u zaleđu grada Zadra (slika 1.). Teren je tipičan primjer dinarskog krša, građen od karbonatnih stijena. Gornji dio terena karakteriziran je kao izrazito okršten i relativno plitki sloj, dok su dublji dijelovi slabo propusne stijenske mase s mrežom pukotina kroz koje se odvija glavina toka [6]. Vodonosnik "Bokanjac – Poličnik" predstavlja složeni krški sustav isprepleten rasjedima, nepropusnim slojevima, ponorima i izvorima. Sustav se može podijeliti u nekoliko podslivova, ali njihove granice nisu jasno definirane. Kretanja podzemne vode u smjeru je sjeverozapada s prosječnom brzinom od 0,08 m/s, što je dokazano traser-testovima (Fritz, 1976). Također, dokazana je i podzemna konekcija od ponora Biljane Donje do izvora Golubinka koji se nalazi na sjevernom dijelu sliva "Bokanjac – Poličnik" (slika 1.). Voda iz vodonosnika služi za opskrbu stanovništva grada Zadra i okolne regije. Aktivno je pet izvora unutar regije: Bokanjac (B4 i B5) – minimalni kapacitet 30 l/s, maksimalni 500 l/s, Jezerce – minimalni 30 l/s, maksimalni 500 l/s, Golubinka – minimalni 50 l/s, maksimalni 300 l/s, Boljkovac – minimalni 40 l/s, maksimalni 100 l/s.



Slika 1. Hidrogeološka karta sjevernog dijela sliva "Bokanjac – Poličnik"

3 Hidrodinamički model strujanja podzemnih voda

Programski paket Modflow koristio se u analizi strujanja podzemnih voda, zajedno sa SCPE numeričkom strategijom, kako bi se dobio uvid u raspodjelu ekvipotencijala i strujnog polja unutar vodonosnika. Modflow se vrlo često primjenjuje u simulaciji toka podzemnih voda pri različitim hidrogeološkim uvjetima [7, 8]. Rezultati strujanja podzemne vode dobiveni su rješavanjem jednačbe

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

gdje su:

k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} - hidraulička vodljivost u smjeru x , y i z

h - piezometarska visina

W - volumski protok koji predstavlja izvor i/ili ponor

S_s - koeficijent specifičnog uskladištenja poroznog medija, t vrijeme.

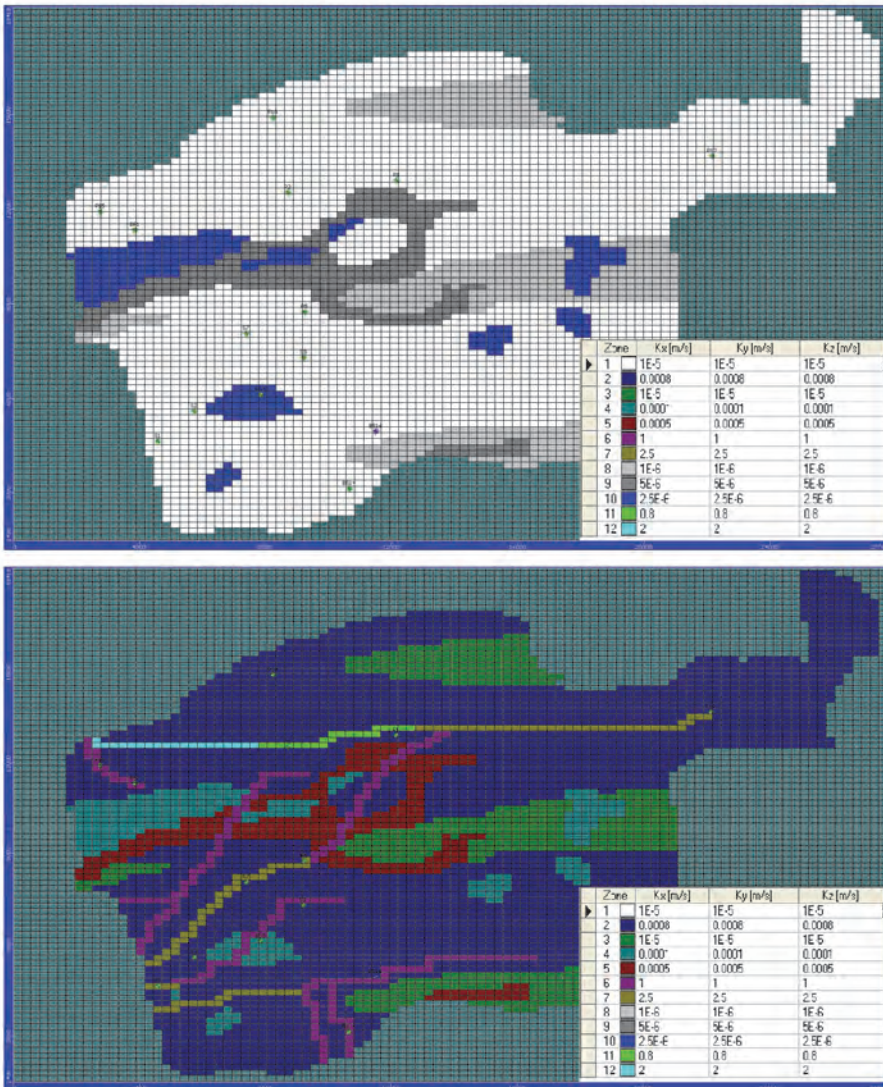
Sliv “Bokanjac – Poličnik” predstavljen je ortogonalnom mrežom s ćelijama dimenzija 200 x 200 m u horizontalnoj ravnini (slika 2.) te s dva sloja u vertikalnom smjeru. Donji sloj je debljine 1 m (od -2 m n. m. do -1 m n. m.), a gornji 101 m (od -1 m n. m. do 100 m n. m.). Kalibracija se odnosi na period od 29. siječnja do 30. lipnja 1967. (153 dana), oslanjajući se na izmjerene razine podzemne vode u piezometrima P1, P2, P5, P10, P12, P15, BP1, S1, S2, S7, S9, BS5, BS14, BS16 (slika 2). Upotrijebljeni su podaci dnevnih oborina s ombrografske stanice smještene unutar analiziranog područja. Primijenjena je vrijednost koeficijenta infiltracije od 0,6 [9]. Vremenske serije razina podzemnih voda s piezometara P15, S1 i BS14 služile su kao rubni uvjeti modela (slika 2.). Parametrizacija modela u smislu određivanja prikladnih vrijednosti hidrauličke vodljivosti $k_{x,y,z}$, efektivne poroznosti n_{eff} i ukupne poroznosti n_{tot} usvojena je na temelju kalibracijskog procesa, a vrijednosti su prikazane na slikama 3 i 4 te u tablici 1. Velike brzine javljaju se u donjem sloju, gdje su zadane veće vrijednosti koeficijenta provodljivosti s ciljem simulacije pukotina kroz koje protječe većina toka.



Slika 2. Prostorna domena vodonosnika “Bokanjac – Poličnik” unutar modela Modflow, lokacije piezometara i rubnih uvjeta korištenih u kalibraciji

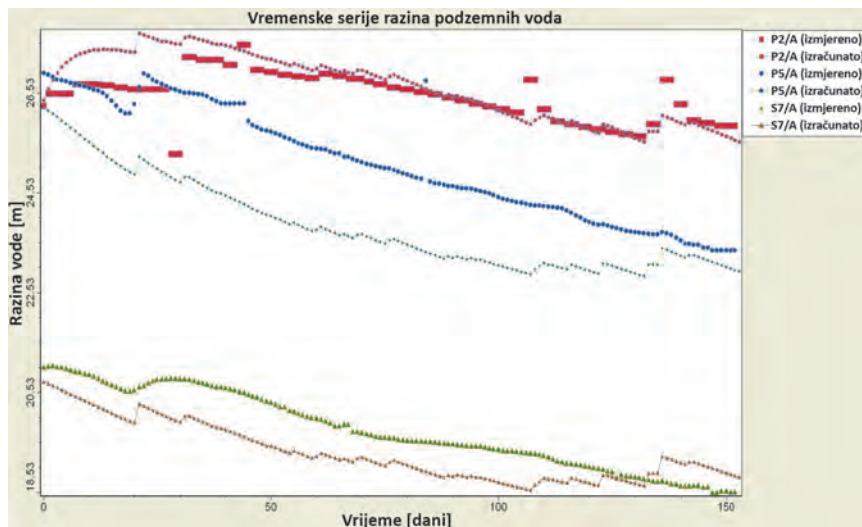
Tablica 1. Vrijednosti efektivne poroznosti n_{eff} i ukupne poroznosti n_{tot} usvojene na temelju kalibracijskog procesa

Sloj	Parametar	
	n_{eff} (1)	n_{tot} (1)
Gornji	0,09	0,1
Donji	0,06	0,15
	0,03	0,15
	0,05	0,15



Slika 3. Prostorna raspodjela koeficijena hidrauličke vodljivosti na gornji sloj (iznad) i donji sloj (ispod)

Rezultati usporedbe razina podzemnih voda između modeliranih i izmjerenih vrijednosti na piezometrima P2, P5 i S7 prikazani su na slici 4. Razlika između modeliranih i izmjerenih vrijednosti razina podzemne vode nalazi se unutar kalibracijskog kriterija od plus, minus 1,5 m [10].



Slika 4. Mjerene i modelirane vremenske serije dnevnih razina podzemnih voda na piezometrima P2, P5, S7 tijekom kalibracijskog perioda 29. siječnja 1967-30. lipnja 1967.

4 Zaključak

Prividne brzine dobivene simulacijom odgovaraju mjerenim vrijednostima. Najveće brzine javljaju se u smjeru istok-zapad, od piezometra P1 prema izvoru Golubinka i iznose između 0,8 m/s i 0,12 m/s. Takve brzine ostvarene su manjom efektivnom poroznošću pukotina ($n_{eff} = 0,03$). Brzine u smjeru sjever-jug, prema Bokanjačkom blatu i bunarima Jezerce, B4 i B5 nešto su manje i iznose od 0,2 m/s do 0,4 m/s, što je posljedica manje propusnih slojeva tla koji razdvajaju sjeverni i južni dio sliva “Bokanjac – Poličnik”.

Simulacija je pokazala da se definiranjem pukotina na način da im se pridruže velike vrijednosti koeficijentata propusnosti mogu dosljedno opisati pojave unutar vodonošnika, a da nisu potrebni sofisticiraniji modeli kao što je hibridni model (HM).

Literatura

- [1] Svensson, U.: A continuum representation of fracture networks, Part I: Method and basic test cases, *Journal of Hydrology*, 250 (2001), pp. 170-186
- [2] Knowles, L. et al.: Hydrogeology and simulated effects of ground-water withdrawals from the Floridan Aquifer System in Lake County and in the Ocala National Forest and vicinity, U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report, pp. 140, 2002.
- [3] Grubbs, J.W., Crandall, C.A.: Exchanges of water between the Upper Floridan aquifer and the Lower Suwannee and Lower Santa Fe Rivers, Florida: U.S. Geological Survey Professi-

- onal Paper, pp. 83, 2007.
- [4] Davis, J.H. et al.: Nitrate-N movement in groundwater from the land application of treated municipal wastewater and other sources in the Qakulla Springs springshed, U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report, pp. 90, 2010.
 - [5] Sepulveda et al.: Groundwater flow and water budget in the surficial and Floridan aquifer systems in east-central Florida, U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report, pp. 214, 2012.
 - [6] Pavičić, A., Terzić, J., Berović, N.: Hydrogeological relations of the Golubinka karst spring in Ljubač Bay, Dalmatia, Croatia. Geol. Croat., 59 (2006), pp. 123–135.
 - [7] El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., Kaufmann, O.: Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Marocco), Journal of Hydro-environment Research, 2 (2008), pp. 192-209.
 - [8] Posavec, K., Mustač, I.: Zone sanitarne zaštite međimurskih vodocrpilišta, Hrvatske vode, 17 (2009) 68, pp. 113-124.
 - [9] Bonacci, O.: Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of the Gradole karst spring catchment, Hydrological Sciences-J'ournal-des Sciences Hydrologiques, 46 (2001) 2, pp. 287-299.
 - [10] Gellegos, J.J. et al.: Simulating flow in karst aquifers at laboratory and sub-regional scales using MODFLOW

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.25>

Primjena Stimela okruženja na izvorištu Radobolja u Mostaru

Tatjana Džeba

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet
kontakt: tatjana.dzeba@tel.net.ba

Sažetak

Okosnicu vodoopskrbnog sustava grada Mostara čine izvorišta Radobolja i Studenac. Potreba zaštite njihovog slivnog područja i zaštite od utjecaja vode iz izgrađenih hidrotehničkih akumulacija je sve izraženija, a održavanje, razvoj i unapređenje postojećeg sustava brze filtracije i dezinfekcije na izvorištu Radobolja od izuzetnog je značenja. Stoga se ovim radom daje pregled postojećih modela procesa pripreme vode za piće i razmatra ideja za mogućnost primjene i razvoja Stimela okruženja modeliranja na izvorište Radobolja. Modeliranje bi omogućilo optimalan učinak stanice i poboljšanje do sada samo iskustvenog upravljanja stanicom. Spomenuta ideja bi se razradila kroz istraživanje i zaokružila doktorskim radom.

***Glavne riječi:** slivno područje, kvaliteta vode za piće, izvorište Radobolja, modeliranje procesa pripreme, Stimela okruženje*

Application of Stimela environment on Radobolja Spring in Mostar

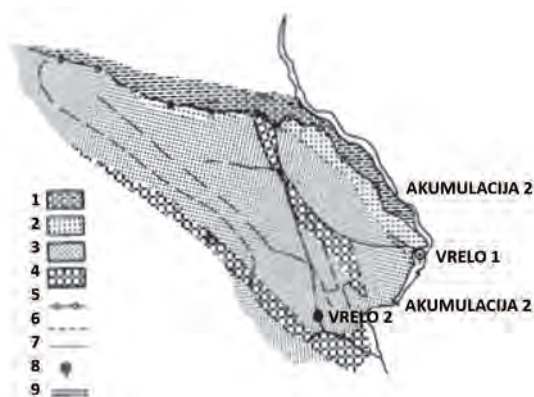
Abstract

Base of water supply system for city of Mostar are springs Radobolja and Studenac. A need for environmental protection of their catchments and protection from influence of water from reservoirs is growing constantly, while maintenance, development and improvement of existing rapid filtration and disinfection system on Radobolja Spring has exceptional value. This paper gives an overview of existing models for water treatment process and discusses idea for application and development of Stimela environment on Radobolja Spring. Use of models would enable optimum efficiency and improve current experience-based management of water treatment plant. This idea would be further developed through research and result with PhD thesis.

***Keywords:** catchment, drinking water quality, Radobolja Spring, water treatment modeling, Stimela environment*

1 Uvod i pregled dosadašnjih ispitivanja područja izvorišta

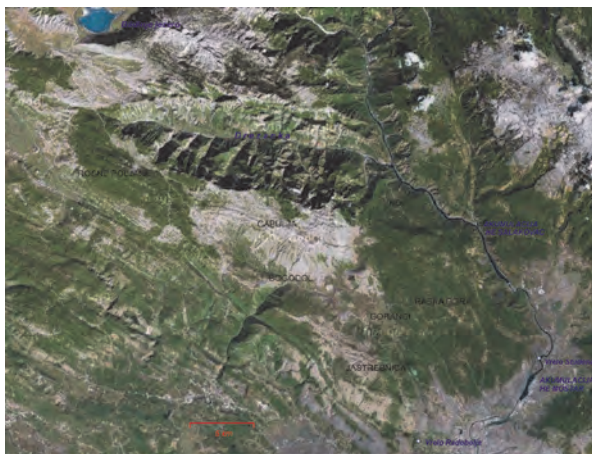
Vodoopskrba urbanog područja grada Mostara oslanja se na dva glavna izvorišta: vrelo Radobolje i Studenac čiji slivovi predstavljaju složenu cjelinu s varijabilnim granicama. Slivno područje pretežno karbonatnog masiva izgrađeno je od pukotinsko kavernoznih krednih i eocenskih krečnjaka, rjeđe vodopropusnog fliša i slabo vodopropusnog glacialnog zrnatog materijala. Slabo vodopropusni dolomiti (T3, J3) leže u podini klasificiranih krečnjaka, koji ubrani u siklinorijum zajedno s podužnim i reverznim i normalnim rasjedima omogućavaju kretanje podzemnih voda ka centralnom depresijskom dijelu, pri čemu značajnu ulogu u povezivanju pri nekim stanjima voda imaju dva dijagonalna rasjeda.



Slika 1. Sliv vrela s glavnim geološkim karakteristikama

Površina sliva oba izvorišta iznosi oko 280 km². Pomoću podataka o otjecanjima na vrelo Radobolje (vrelo 2), za niz od 40 godina, određena je slivna površina za to vrelo u iznosu od približno 100 km², a za sliv Studenac (vrelo 1) 180 km².

Prosječna je nadmorska visina sliva vrela Studenca (vrelo 1) oko 990 m n. m., a vrelo Radobolje oko 840 m n. m. Vrelo Studenac je na oko 66 m n. m. Prirodni minimum vrela 1 određen je s 1 m³/s, koji se puštanjem u pogon akumulacije Salakovac 80-ih godina (akumulacija 2) povisio na 2,5 m³/s. U prirodnom režimu zabilježen je prosječni protok vrela Studenac u iznosu od 6,4 m³/s. Protoci vrlo velikih voda su reda 40 m³/s, od kojih 10 m³/s istječe kroz pukotinski sustav u koritu vodotoka, a 30 m³/s preko povremenog vrela P1. Istražnim bušenjima utvrđena su tri pukotinska sustava-provodne zone, i to glavni s najvećim tlakovima na 140 m dubine, drugi na 50 m - 60 m dubine i treći između 10 m i 20 m dubine.



Slika 2. Satelitski snimak položaja akumulacija i slivnog područja vrela Radobolja i Studenca

U jednom od elaborata, izrađenom u travnju 1990. godine, analiziran je utjecaj akumulacije Salakovac (akumulacija 2) i akumulacije Mostar (akumulacija 1) na izvorište Studenac i utvrđeno je sljedeće: utok i dotok voda iz akumulacije Salakovac u izvorište Studenac najveći je u periodu malih voda, dok se kod većih voda taj priljev smanjuje da bi za protok od $6 \text{ m}^3/\text{s}$ utjecaj pao na samo 20 %. Provedena fizikalno-kemijska i hidrobiološka ispitivanja su potvrdila navedenu činjenicu o utjecaju akumulacije Salakovac. Također je u tijeku probnog punjenja akumulacije Mostar, provedena hidrodinamička analiza. Pri razini akumulacije Mostar od 72 m n. m. simuliran je rad svih bunara (pet po $120 \text{ dm}^3/\text{s}$ i dva po $250 \text{ dm}^3/\text{s}$, tj. ukupno $1100 \text{ dm}^3/\text{s}$). Simulacija je pokazala da će jedino i tijekom povećanja razine vode pri uspostavljenom novom stacionarnom stanju na razini 78 m n. m. jedan od bunara (B-3) primati vodu iz akumulacije Mostar. Za oba vrela je izrađen model padaline - otjecaj.

2 Aktualni modeli pripreme vode

Stupanj složenosti pripreme vode za piće ovisi s jedne strane o kvaliteti sirove vode koja se upotrebljava, a s druge strane o zakonski propisanoj kvaliteti vode za piće. Iskustva s modeliranjem pripreme vode za piće nisu velika, jer su počeci modeliranja pripreme vode za piće zabilježeni tek 1990-ih godina [1]. Razlozi tako male uporabe su količina podataka potrebna za testiranje te kalibriranje modela i krutost modela tijekom primjene izvan kalibriranog područja.

Od postrojenja za pripremu vode za piće, na izvorištu Radobolja postoje brzi filtri i sustav dezinfekcije, a na izvorištu Studenac samo se provodi dezinfekcija. Uglavnom se rad stanice za pripremu vode za piće do sada bazirao na iskustvu operatera, pa je to slučaj i s postojećim sustavom za pripremu vode za piće na izvorištu Radobolja.

Većinom godine kvaliteta je vode na izvorištu dobra, pa se od postupaka provodi samo dezinfekcija, a kvaliteta vode se svakodnevno u tijeku radnog tjedna prati i analizira u Higijenskom zavodu Mostar.

U periodima velikih kiša i izraženih pljuskova dolazi do zamučivanja, pa se u tim slučajevima voda za piće pročišćava brzim filtriranjem na postojećoj stanici na izvorištu, te dezinficira. Osim iskustva dežurnog operatera, ne postoji nikakav model kojim se prati i optimizira proces.

Sadašnja dostignuća u oblasti procesa pripreme vode za piće [2] usmjerena su na dobivanje modela s konceptom „stvarne stanice za preradu vode“ kao sredstva za oponašanje već izgrađene stanice i time alata za pomaganje operateru u iznalaženju optimalnih odrednica za rad same stanice. U tablici 1. prikazani su aktualni raspoloživi modeli i njihove karakteristike.

Tablica 1. Rezime karakteristika modela [3]

Modeli: karakteristike	OTTER (WRC – Komisija za istraživanje voda, SAD)	Stimela (Tehnički univerzitet u Delftu, Nizozemska)	Metrex (Tehnički univerzitet u Duisburgu, Njemačka)	WTP (EPA US– Agencija za zaštitu okoliša, SAD)	WatPro (Hydromantis, Kanada)
Dinamičnost?	DA	DA	DA	NE	NE
Prerada mulja?	DA	NE	NE	NE	NE
Recirkulacija?	DA	DA	NE	NE	NE
Dizinfekcija?	DA	DA	DA	DA	DA
Bistrenje?	DA	NE	DA	NE	NE
Filtracija?	DA	DA	DA	NE	NE
Lako proširenje?	NE	DA	NE	NE	NE
Projektiranje i u radu?	DA	DA	NE	DA	DA
Istraživačka uporaba?	NE	DA	DA	NE	NE
Lakoća uporabe?	DA	NE	NE	DA	DA

Stimela i Matrex okruženje modeliranja koriste okvirni alat – MATLAB / Simulink. Korištenje MATLAB / Simulinka čini modele Stimela okruženja jednostavnim i pristupačnim, struktura modela je otvorena i fleksibilna, grafička vizualizacija rezultata je također dostupna i nije nužno da korisnik uči MATLAB ili Simulink.

3 Modeliranje pripreme vode za piće u Stimela okruženju

Stimela je okruženje modeliranja koje je razvijeno i koje se i dalje razvija u kompaniji DHV Water BV (DHV Water BV, 2016) i Tehničkom sveučilištu u Delftu – Nizozemska. To sveučilište ima dužu tradiciju korištenja modeliranja u edukacijske i znanstvenoi-straživačke svrhe, te je na njemu već obranjeno nekoliko znanstveno-stručnih disertacija, koje se bave razvojem i primjenom modela Stimela okruženja [4]. Stimela modeli procesa pripreme vode za piće zahtijevaju definiranje različitih parametara kvalitete vode (parametri ovisni o konkretnom procesu). Svaki blok sadrži datoteke, odnosno parametre koji su relevantni za taj blok i proces prerade, te druge podatke koji opisuju stanje tih procesa (gubici tlaka u filtrima, stupanj zasićenja aktivnog ugljena, veličina zrna u reaktoru za omekšavanje i sl.). Simulacija modeliranjem može biti pokrenuta nakon utvrđivanja svih potrebnih parametara u okviru definiranih datoteka, birajući metodu povezivanja u blok-dijagram, veličinu koraka i vrijeme simulacije. Nakon simulacije dobiva se grafički izlaz (eventualno i tablični prikaz) otvaranjem izlaznog bloka. Izračunane vrijednosti iz izlaznih blokova modela mogu se usporediti s izmjerenim vrijednostima i dalje, u okviru primjene modela, provoditi kalibracija, verifikacija, odnosno testiranje modela koristeći odgovarajuću bazu podataka.

U BiH je izrađen i obranjen doktorski rad u Stimel okruženju modeliranja [2], gdje je prikazana efektivna primjena ovog modela kroz primjere dviju filtarskih stanica (FS) u BiH (FS »Crkvice« Zenica i FS »Tilave« Sarajevo). Potvrđene su povoljne mogućnosti primjene modeliranja iz Stimela okruženja na FS u BiH. Definirana je procedura, odnosno koraci tijekom primjene modeliranja procesa konvencionalnog filtriranja. Dokazano je da primjena modela znači bolju i učinkovitiju primjenu podataka koji se prate na stanici kroz definiranje baze podataka za modeliranje, te bolje razumijevanje procesa povećanjem uvida kako različiti parametri djeluju na sam proces, posebno na njegove izlazne/kontrolne parametre. Također, koristeći mogućnosti modeliranja, dokazana je mogućnost djelotvornijega korištenja raspoloživih kapaciteta FS (na primjer, izborom odgovarajućeg tipa ispune, odnosno odgovarajućih operacijskih parametara). Ovim radom je dokazano da modeliranje može biti instrument podrške u pripremi vode za piće, maksimalno koristeći raspoložive podatke i instalirane kapacitete, odnosno opremu i objekte stanice.

4 Zaključak

Kao zaključak se nameće činjenica da primjena modeliranja znači podršku procesima prerade bez velikog oslanjanja na iskustvene podatke i skupa pilot istraživanja.

Budući da pojedini blokovi Stimela okruženja nisu do sada dovoljno istraživani (npr. dezinfekcija), mogućnost izrade doktorskog rada za izvorište Radobolja u Stimela okruženju značilo bi primjenu i usavršavanje postojećeg modela na brze filtre na izvorištu Radobolja i razvoj modela za dezinfekciju u ovom okruženju.

Literatura

- [1] Dudley, J., Dillon, G., Rietveld, L.C.: Water treatment simulators, J. Water Supply: Res. Technol.- AQUA, 57 (2008) 1
- [2] Jusić, S.: Novi pristupi modeliranju pripreme vode za piće, VODOPRIVREDA 0350-0519, 48 (2016) 282-284, pp. 191-201
- [3] Hamouda, M.A., Best, J., Anderson, W. B. i Huck, P.M: What Dynamic Simulation Can Add to Water Utility Risk Assessment, Conference: 2014 OWWA/OMWA Joint Annual Conference and Trade Show, London, May 4th - 7th, 2014
- [4] Rietveld, L.C.: Improving Operation of Drinking Water Treatment through Modeling, PhD Dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, University of Technology, TU Delft, 2005.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.36>

Procjena nosivog kapaciteta vodnih resursa primjenom analize neodređenosti i osjetljivosti

Marin Kuspilić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
kontakt: mkuspilic@grad.hr

Sažetak

Nosivi kapacitet vodnih resursa (NKVR) predstavlja maksimalni broj osoba (stanovnika) koje mogu neograničeno obitavati na nekom području, koristeći pritom dostupne vodne resurse. NKVR svoju primjenu nalazi u aktivnostima procjene održivosti te prilikom radnji vezanih uz prostorno planiranje i gospodarenje vodnim resursima. Podaci potrebni za izradu procjene NKVR često su nedovoljno pouzdani ili stohastičke naravi. Primjenom analize neodređenosti moguće je na temelju spoznaje o neodređenosti ulaznih podataka odrediti nepouzdanost dobivene procjene. Analizom osjetljivosti moguće je kvantificirati utjecaj neodređenosti ulaznih veličina na nepouzdanost dobivene procjene. U ovom radu je, pomoću prethodno navedenih metoda, dana procjena nosivog kapaciteta vodnih resursa otoka Cresa uz prikaz utjecaja parametara korištenih u proračunu na nepouzdanost dobivenog rezultata.

Ključne riječi: nosivi kapacitet vodnih resursa, analiza osjetljivosti, analiza neodređenosti, Monte Carlo simulacija, gospodarenje vodnim resursima

Assessment of water resources carrying capacity using uncertainty and sensitivity analyses

Abstract

The water resources carrying capacity (WRCC) is defined as the maximum size of human population that can be sustained by natural environment, given its available water resources. It is most commonly used in sustainability assessment, land planning and water management activities. The data required for the WRCC assessment are usually insufficiently accurate or have stochastic features. The uncertainty analysis takes into account uncertainty of input data in order to determine reliability of an assessment. The sensitivity analysis is able to quantify the effect the uncertainty of input data has on reliability of assessment. An approach based on previously mentioned methods is used in this paper. Based on this approach, the water resources carrying capacity of the island of Cres is calculated, and the effect the parameters used in the assessment have on the calculated result is presented.

Keywords: water resources carrying capacity, sensitivity analysis, uncertainty analysis, Monte Carlo simulation, water resources management

1 Uvod

1.1 Koncept nosivog kapaciteta vodnih resursa

Nosivi kapacitet vodnih resursa (NKVR) predstavlja veličinu kojom se određuje brojnost ljudske populacije koja može opteretiti promatranu regiju s obzirom na dostupne vodne resurse. Za njegovo određivanje potrebno je odrediti količinu dostupnih obnovljivih vodnih resursa te potrošnju navedenih resursa uzrokovanu ljudskim potrebama (aktivnostima) te potrebama ekosustava.

Nedostatak dovoljne količine vode obično ima značajan utjecaj na gotovo sve ljudske aktivnosti i zato je NKVR izrazito važna sastavnica procjene održivosti. Većina dostupnih metoda procjene NKVR mogu se ugrubo smjestiti u dvije grupe. Prva grupa procjena bazirana je na kompleksnim determinističkim modelima, poput dinamike sustava [1], a druga na probabilističkom pristupu [2]. U ovom radu primijenjene su probabilističke metode.

1.2 Predloženi pristup proračunu

Podaci potrebni za navedenu procjenu, poput količine oborina, stupnja evapotranspiracije, te potrošnje vode svih kategorija potrošača vrlo su često nedovoljno poznati ili stohastičkog karaktera. Vrlo rijetko se ovi parametri mogu procijeniti s točnošću koja bi rezultirala pouzdanom determinističkom vrijednošću NKVR.

Pristup procjene NKVR baziran na analizi osjetljivosti i neodređenosti primjenjen je u ovom radu kako bi se prethodno navedene neodređenosti mogle uzeti u obzir (kvantificirati) prilikom izrade procjene.

1.3 Opis lokacije

Otok Cres, najveći hrvatski otok, predstavlja područje odabrano za procjenu NKVR. Prema popisu stanovništva iz 2011., na otoku se nalazi 3079 stalnih stanovnika [5]. Tijekom turističke sezone (čiji vrhunac se najčešće dostiže u srpnju i kolovozu) broj turista nerijetko nadmaši broj stalnog stanovništva, pri čemu ukupan broj stanovnika na otoku premaši više nego dvostruki iznos stalnog stanovništva.

Vodoopskrba otoka Cresa u potpunosti se oslanja na oborine. Dio oborina koje padnu na područje otoka slijevaju se u Vransko jezero, što predstavlja jedino izvorište na otoku. Količina oborina te potražnja za vodom (potrošnja vode) imaju izražene sezonske varijacije. Ljetni periodi su uglavnom sušni te praćeni povećanom potražnjom za vodom, izazvanom značajnim priljevom turista na otok. Vodoopskrba otoka se pri ovakvim uvjetima nalazi pod značajnim pritiskom. Podatak o maksimalno dopuštenom broju stanovnika koji osigurava održivost u pogledu korištenja vodnih resursa (tj. NKVR) može značajno pripomoći i olakšati aktivnosti prostornog planiranja te gospodarenja vodnim resursima, ako je održivost cilj navedenih aktivnosti.

2 Metoda proračuna

2.1 Analitički izraz za proračun NKVR

Ovim radom dana je samo preliminarna procjena NKVR. Proračun je proveden prema jednostavnom izrazu koji, na temelju podataka o količini dostupne vode generirane oborinama, o potrošnji vode te o pojednostavljenim pokazateljima gubitaka vode, daje traženu vrijednost. NKVR je izračunan prema izrazu:

$$NKVR = \frac{10^3 (1 - c_n) \sum_{i=1}^{12} H_i A_V}{\sum_{i=1}^{12} \frac{D_i}{(1 - c_{i,j})}} \quad (1)$$

gdje su:

NKVR - nosivi kapacitet vodnih resursa [stanovnik], c_n - koeficijent prirodnih gubitaka, $c_{t,i}$ - mjesečni koeficijent tehničkih gubitaka, H_i - godišnja količina oborine [mm], A_V - površina sliva Vranskog jezera [km²], D_i - mjesečna potrošnja vode po stanovniku [m³stanovnik⁻¹mjesec⁻¹].

Dio oborine koji se može iskoristiti za vodoopskrbu predstavlja samo djelić od ukupne količine vode koja u obliku oborine završi na otoku. Veći dio oborine se izgubi procesima evaporacije, transpiracije, infiltracije te otjecanjem u more. Dio oborine koji preostaje, te se može iskoristiti za vodoopskrbu, u modelu je izoračunan uvođenjem *koeficijenta prirodnih gubitaka*, c_n . Taj koeficijent predstavlja postotak oborine koji se ne može koristiti za vodoopskrbu, tj. dio koji se "izgubi" prethodno navedenim procesima. Gubici vode koji se pojavljuju u procesu zahvaćanja, transporta i distribucije vode proračunom se uzimaju u obzir uvođenjem *koeficijenta tehničkih gubitaka*, c_t .

2.2 Analiza neodređenosti i Monte Carlo pristup

Većina varijabli koje se koriste u izrazu (1) stohastičke su naravi (obično praćene i značajnom raspršenošću) ili se njihove vrijednosti ne mogu dovoljno precizno odrediti. Spomenuta neodređenost kvantificira se transformiranjem svakog od korištenih parametara u slučajnu varijablu s pripadnom distribucijom vjerojatnosti temeljem dostupnih mjerenih podataka o traženim parametrima [4].

Monte Carlo simulacijom nasumično se odabiru vrijednosti ulaznih varijabli (vodeći pritom računa o distribuciji vjerojatnosti ulaznih veličina), nakon čega se izračunava NKVR. Nasumičan odabir ulaznih veličina te naknadni proračun provedeni su 200.000 puta, čime je dobiveno mnoštvo mogućih rezultata.

Neodređenost ulaznih veličina se propagira kroz predloženi model, zbog čega i traženi rezultat (NKVR) postaje neodređena veličina kojoj se naknadno pridodaje distribucija vjerojatnosti.

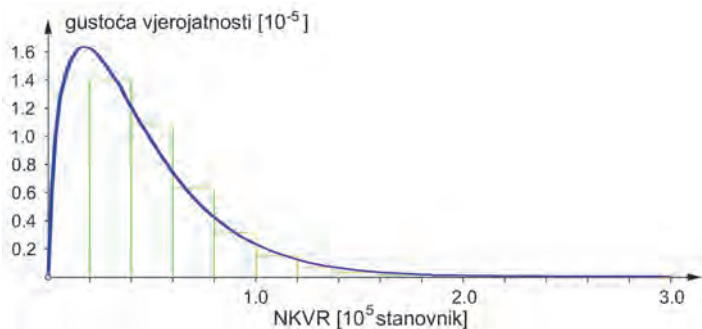
2.3 Analiza osjetljivosti

Analiza osjetljivosti predstavlja skup metoda i alata kojima se kvantificira utjecaj neodređenosti ulaznih veličina u modelu na nepouzdanost dobivenog rezultata. *Indeks osjetljivosti ukupnog učinka* [6] predstavlja odabranu mjeru kojom će se odrediti utjecaj navedenih neodređenosti ulaznih parametara na nepouzdanost rezultata. Navedeni indeks daje informaciju o tome do koje je mjere raspršenost dobivenog rezultata uzrokovana raspršenošću svakog od ulaznih parametara.

3 Rezultati

3.1 Rezultati analize neodređenosti

Prikaz rezultata analize neodređenosti dan je na slici 1., gdje je prikazana razdioba vjerojatnosti $NKVR_x$, tj. razdioba vjerojatnosti nosivog kapaciteta vodnih resursa koji odgovara postojećem stanju vodoopskrbe (gdje jedino izvorište vode za potrebe vodoopskrbe predstavlja Vransko jezero).



Slika 1. Distribucija vjerojatnosti NKVR otoka Cresa

Distribucija vjerojatnosti je asimetrična, a najučestalije vrijednosti se nalaze oko vrijednosti od 20.000 stanovnika. Navedene vrijednosti ne predstavljaju vrstu podataka dovoljno korisnu za potrebe ocjene održivosti. Korisnije je razmotriti podatke koji su u stanju kvantificirati vjerojatnost dugoročnog opstanka stanovnika na otoku.

Medijan NKVR iznosi 37.020 stanovnika. Ako bi navedeni broj stanovnika obitavao na otoku, svake bi druge godine (u prosjeku) dolazilo do nestašice vode. Kada bi broj

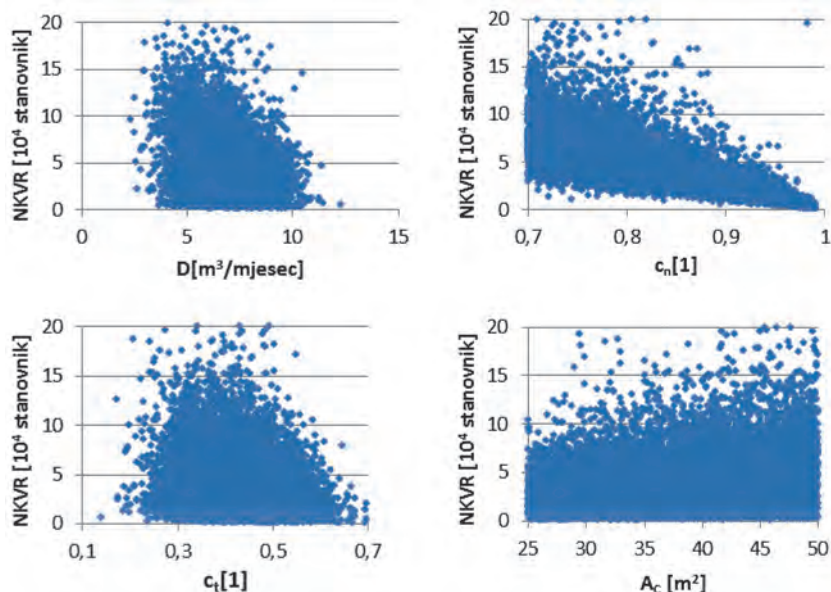
stanovnika na otoku iznosio 2.713 (što predstavlja vrijednost koja odgovara prvom percentilu distribucije vjerojatnosti NKVR), do nestašice vode bi dolazilo u prosjeku samo jednom tijekom perioda od sto godina. Vrijednosti NKVR koje odgovaraju karakterističnim vrijednostima percentila prikazane su u tablici 1., gdje se može vidjeti međusobna zavisnost predviđenog broja stanovnika na otoku i vjerojatnosti pojave nestašice vode.

Tablica 1. Percentili NKVR otoka Cres

Percentil	1	2	5	10	50 (medijan)
NKVR [stanovnik]	2.713	3.516	5.698	9.058	37.020

3.2 Rezultati analize osjetljivosti

Analiza osjetljivosti je provedena kako bi se identificirali najutjecajniji čimbenici nepouzdanosti procjene NKVR. Iz dijagrama raspršenosti, prikazanih na slici 2., može se promotriti kako promjena vrijednosti četiri korištena parametra utječe na raspršenost rezultata; srednje godišnje potrošnje vode (D), koeficijenta prirodnih gubitaka (c_n), koeficijenta tehničkih gubitaka (c_t) te površine sliva Vranskog jezera (A_c).



Slika 2. Dijagrami raspršenosti nekih parametara korištenih u proračunu NKVR

Vrijednosti navedenih parametara karakterizira nepouzdanost većinski vezana uz nedostatak mjerenja; dodatnim istraživanjem može se smanjiti raspon mogućih vrijednosti, tj. povećati točnost procjene navedenih parametara. Količinu oborina, s druge strane, karakterizira nepouzdanost vezana uz stohastičku narav procesa, zbog čega se raspršenost mogućih vrijednosti ne može značajno smanjiti dodatnim istraživanjem. Promatranjem dijagrama raspršenosti može se vidjeti da svi prikazani parametri, osim c_n , imaju vrlo slab utjecaj na promjenu raspršenosti rezultata. Koeficijent prirodnih gubitaka, c_n , predstavlja jedinu veličinu (od prikazanih) koja promjenom svoje vrijednosti značajnije utječe na promjenu raspršenosti NKVR.

Tablica 2. Indeks osjetljivosti parametara korištenih u proračunu NKVR

Parametar	Indeks osjetljivosti ukupnog učinka	Utjecaj varijacije parametra na varijancu rezultata [%]
Visina oborine u siječnju, H_1	0,2752	5,16
Visina oborine u veljači, H_2	0,2737	5,13
Visina oborine u ožujku, H_3	0,4614	8,64
Visina oborine u travnju, H_4	0,2733	5,12
Visina oborine u svibnju, H_5	0,2734	5,12
Visina oborine u lipnju, H_6	0,2734	5,12
Visina oborine u srpnju, H_7	0,6542	12,25
Visina oborine u kolovozu, H_8	0,2735	5,12
Visina oborine u rujnu, H_9	0,2749	5,15
Visina oborine u listopadu, H_{10}	0,2738	5,13
Visina oborine u studenom, H_{11}	0,2744	5,14
Visina oborine u prosincu, H_{12}	0,2738	5,13
Veličina sliva Vranskog jezera, A_c	0,3479	6,52
Prirodni gubici vode, c_n	0,4814	9,02
Tehnički gubici vode, c_t	0,3051	5,72
Jedinična potrošnja vode, D	0,3489	6,54
Zbroj indeksa	5,3384	100,00

Vrijednosti indeksa osjetljivosti izračunane su kako bi se kvantificirao utjecaj svakog parametra korištenog u procjeni NKVR, te su dobivene vrijednosti prikazane u tablici 1.

Parametri koji najviše utječu na promjenu raspršenosti (varijabilnost) rezultata su visina oborine u ožujku i srpnju te koeficijent prirodnih gubitaka, c_n . Najveći utjecaj na raspršenost rezultata imaju parametri stohastičke prirode, tj. mjesečne visine oborina. Kada se zbroje utjecaji spomenutih parametara (tj. svih mjesečnih oborina), može se zaključiti da njihova raspršenost uzrokuje više od 70 % raspršenosti NKVR.

4 Zaključak

Nosivi kapacitet vodnih resursa otoka Cresa procijenjen je predloženom metodom koja se temelji na analizi neodređenosti i osjetljivosti. Dobiveni rezultati analize neodređenosti mogu se koristiti za grubu procjenu NKVR otoka, a rezultati analize osjetljivosti daju podatke o najvećim izvorima nepouzdanosti rezultata te se mogu koristiti kao pomoć u određivanju prioriteta daljnjeg istraživanja.

Rezultat analize neodređenosti predstavlja distribuciju vjerojatnosti vrijednosti NKVR. Na temelju navedene distribucije, prikazane u ovom radu, može se lako dovesti u vezu predviđeni broj stanovnika otoka i vjerojatnost pojave nestašice vode.

Provedenom analizom osjetljivosti prikazano je da parametri koje karakterizira stohastička narav (oborine) najviše utječu na raspršenost NKVR. Neodređenost preostalih parametara (potrošnje vode, površine sliva Vranskog jezera, iznosa tehničkih i prirodnih gubitaka) većim dijelom je uzrokovana nedostatkom mjerenja nego njihovom nepredvidivošću. Nažalost, opsežnija i temeljitija istraživanja koja bi omogućila preciznije vrijednosti tih parametara ne bi bitno povećala pouzdanost procjene.

Literatura

- [1] Wang, S., Xu, L., Yang, F., Wang, H.: Assesment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model, *Science of the Total Environment*, 472 (2014), pp. 1070-1081.
- [2] Dou, M., Ma, J., Li, G., Zuo, Q.: Measurement and assessment of water resources carrying capacity in Henan province, China, *Water Science and Engineering*, pp. 1-12, 2015.
- [3] Liu, R., Sun, C., Han, Z., Chen, L., Huang, Q., Chen, Y., Gao, S., Shen, Z.: Water environmental capacity calculation based on uncertainty analysis: a case study in the Baixi watershed area, China, *Procedia Environmental Sciences*, 13 (2012), pp. 1728-1738.
- [4] Statistički ljetopis Republike Hrvatske, Državni zavod za statistiku, pp. 47, 2016.
- [5] Nacrt studije izvodljivosti vodoopskrbe i odvodnje aglomeracije Cres, Martinšćica, Mali Lošinj i Veli Lošinj, 2015., Hidroing.
- [6] Bonacci, O.: Analiza varijacija razine vode jezera Vrana na otoku Cresu, *Hrvatske vode* 22 (2014) 90, pp. 337-346.
- [7] Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S.: *Global Sensitivity Analysis: The Primer*, Wiley, pp. 164-167, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.16>

Procjena statističkih parametara koncentracije nutrijenata generiranih rijekama u priobalju

Morena Galešić, Roko Andričević, Vladimir Divić

Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
kontakt: mgalesic@gradst.hr

Sažetak

Rijeke su svakako jedan od najvažnijih puteva prijenosa nutrijenata s kopna u obalne vode, koji potom u ušćima mogu izazvati čitav niz problema, od prekoračenja dopuštenih graničnih koncentracija do uzrokovanja pojave eutrofikacije. Provedeno istraživanje se bavi upravo analizom takvog pronosa u bliskoj zoni ušća za stacionarno stanje toka te domenu integriranu po dubini (2D). Iz osnovne advektivno difuzne jednadžbe su izvedeni statistički apsolutni momenti funkcije gustoće vjerojatnosti definirane u točki, te su potom pripadajuće funkcije rekonstruirane korištenjem beta-distribucije. Funkcije gustoće vjerojatnosti su ključan podatak za definiciju rizika od prekoračenja graničnih koncentracija, te ovakva metodologija omogućava izračun funkcije i pripadajućeg rizika u proizvoljnoj točki domene ušća. Razvijena metodologija je implementirana u user-friendly računalnu aplikaciju CPoRT koja je besplatna za korištenje, a koja je među ostalim namijenjena i podizanju svijesti o važnosti adekvatnog upravljanja količinama nutrijenata unesenih rijekama.

Ključne riječi: koncentracija zagađenja, statistički momenti koncentracije, ušća, funkcija gustoće vjerojatnosti, alat za brzu procjenu rizika od zagađenja

Estimation of statistical parameters of nutrients concentration generated in estuaries

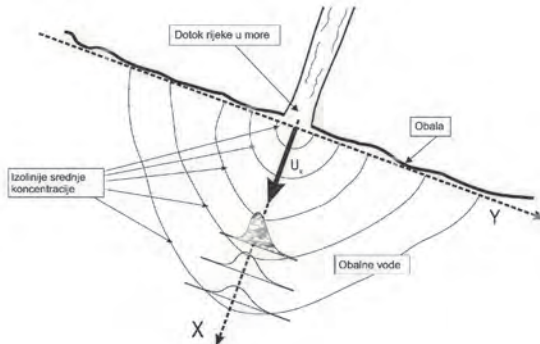
Abstract

Rivers are considered as one of the most influential pathways of nutrients which are generated inland and causing multiple problems when brought to estuaries, from exceeding the limit concentrations to eutrophication issues. This paper investigates such problem in estuary by analysing the steady transport of conservative pollutant in the near field zone of depth integrated domain (2D). The concentration moments are developed from fundamental advection-diffusion equation, and then are utilized to obtain the point concentration probability density function (PDF). PDFs are key data when conducting the risk assessment for exceeding the allowed concentration values, hence this methodology enables one to obtain PDF and corresponding exceedance probability at an arbitrary point in the estuary domain. The developed methodology is further implemented in a user-friendly PC application that is free to use and which is also designed to raise awareness about importance of adequate management of nutrients being generated and brought in by rivers.

Keywords: pollution concentration, concentration moments, estuaries, probability density function, screening tool

1 Uvod i formulacija problema

Obalne vode i posebno ušća rijeka čine iznimno kompleksne ekosustave zahvaljujući složenim hidrodinamičkim karakteristikama kao i prisutnim ekološkim procesima. Rastuća populacija u priobalju, koja iznosi oko 44 % unutar 100 km od obale [1] predstavlja značajan pritisak na već osjetljiv ekosustav bogate prirodne raznolikosti. Ljudski utjecaj ima kontinuirani porast zbog različitih potencijala koja ušća imaju počevši od poljoprivrede i akvakulture, preko prometnih aktivnosti do rekreacije. Rijeke sustavno prikupljaju nutrijente s kopna koji su posljedica poljoprivrede, industrije i stanovništva te ih unose u ušća kao opterećenja [2]. Standardi ekološke kakvoće su definirani na osnovi učestalosti pojavljivanja tvari s obzirom na korištenje pripadne vode od strane Europske komisije i najčešće su opisani graničnim koncentracijama određene tvari. Europska komisija je problem praćenja i procjene ekološkog statusa vodnih tijela definirala kroz Okvirnu direktivu o vodama – ODV [3] te je posebni dokument napravljen za priobalne ekosustave kroz Marine Strategy Framework Directive – MSFD [4]. Procjena količine zagađenja koja premašuje dopuštene koncentracije prema uputama ODV jedan je od nužnih ulaznih podataka potrebnih za konačnu definiciju rizika od eutrofikacije ili razinu osjetljivosti predmetnog akvatorija. Kod definicije količine zagađenja, nužni podaci su vrijednosti koncentracija zagađivača koji se unosi u neki akvatorij. Ključni zagađivači za rizik od eutrofikacije su nutrijenti skupnim imenom, gdje uglavnom dominiraju spojevi dušika [5]. Trenutačno dostupne metode za analizu prekoračenja predmetnog zagađenja uključuju sofisticirane modele koji iziskuju mnogo vremena i ulaznih podataka, što često implicira i skupa te zahtjevna mjerenja ili kontinuirani monitoring. Cilj je ovog rada istražiti kako se na osnovi poznavanja ulazne vrijednosti zagađenja koje rijeka nosi u relativno kontinuiranom obliku na razini godine ili sezone, može definirati njegovo širenje bliskoj zoni samog akvatorija. Na slici 1. dan je shematski prikaz formulacije problema s naznačenim pretpostavkama koje pristup uzima u obzir te dominantne fizikalne procese advekcije i turbulentne difuzije. U nastavku je sažeto prikazano kako se razvio analitički model za procjenu statističkih



Slika 1. Shematski prikaz formulacije problema

karakteristika koncentracija zagađenja uslijed nereaktivnog i stacionarnog pronosa prilikom ulijevanja rijeke u more. Navedeni model je potom implementiran u besplatnu i eng. *user-friendly* računalnu aplikaciju CPoRT (Coastal Pollution Risk Tool) koju su testirali studenti i zainteresirani dionici u upravljanju priobaljem.

2 Metodologija

Cilj ovdje prikazanog istraživanja jest izračun koncentracijskih karakteristika nereaktivnog do slabo reaktivnog zagađivača uslijed pronosa koji nastaje ulijevanjem rijeke u more. Metodologija uključuje analitički izvod statističkih momenata koncentracije takvog zagađivača, a slični pristup je već prije primijenjen u atmosferi [6] i u podzemlju [7], te su potom izračunane funkcije gustoće vjerojatnosti primjenom teorijske distribucije. Sve zajedno je u obliku računskog paketa implementirano u aplikaciju CPoRT [8].

2.1 Izvod statističkih momenata koncentracije zagađenja

U ovom radu se istražuje 2D problem bliske zone miješanja (slika 1. prikazuje karakteristike problema s naglaskom na statistički prikaz zagađenja) za slučaj kontinuiranog i stacionarnog istjecanja rijeke s nereaktivnim pronosom potencijalnog zagađivača (npr. ukupni dušik). Apsolutni statistički momenti koncentracije zagađenja (nutrijenata) izračunani su primjenom niza transformacija fundamentalne advektivno difuzne jednadžbe:

$$\frac{\partial c(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot [v(\mathbf{x}, t)c(\mathbf{x}, t)] = e_m \nabla^2 c(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

gdje je $c(\mathbf{x}, t)$ skalarna koncentracija u jedinici mase po volumenu, $v(\mathbf{x}, t)$ je brzina toka definirana vektorom položaja \mathbf{x} u trenutku t , a e_m je koeficijent molekularne difuzije. Na jednadžbu (1) primijenjen je niz osrednjavanja te aproksimacija bliske zone kako bi se dobili apsolutni momenti koncentracije (m_{n+1}) reda $n+1$, kao što je to opisano u [9]:

$$m_{n+1}(x) = C_0^n \bar{c}(x) + \frac{k\alpha}{U_0} e^{-\frac{k\alpha}{U_0 v}(e^{v\eta} - 1)x} \int_0^x \left(2m_n(\eta) \bar{c}_t - m_{n-1}(\eta) \bar{c}_t^2 - C_0^n \bar{c}(\eta) \right) e^{\left[\frac{k\alpha}{U_0 v}(e^{v\eta} - 1) + v\eta \right]} d\eta \quad (2)$$

gdje je C_0 koncentracija u izvoru zagađenja (ušće), $k = n(n+1)$, $\alpha = e_m / \lambda^2$, a c_t je pozadinska koncentracija medija. Parametar λ definira skalu koncentracijskog gradijenta, $\nabla c = (c - c_t) / \lambda$. Srednja brzina toka je ustaljena i definirana s $U(x) = U_0 e^{-v \cdot x}$, gdje je U_0 brzina rijeke na početku ušća i $v [m^{-1}]$ je robustan koeficijent smanjenja koji skupno predstavlja sve utjecaje koji mogu djelovati na smanjenje inicijalne brzine. Postupak

validacije razvijene metodologije uključivao je terenska mjerenja i korištenje komercijalnog numeričkog modela za pilot područje rijeke Žrnovnice [10].

2.2 Izračun funkcija gustoće vjerojatnosti

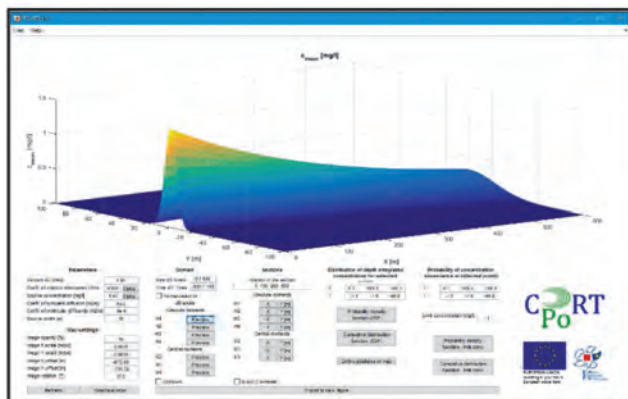
Momenti (2) su ujedno definirani općim izrazom

$$m_n(x, t) = \int_0^{\infty} c^n p(c; x, t) dc \quad (3)$$

kao statistički momenti funkcije gustoće vjerojatnosti ($p(c; x, t)$) definirane u točki. Funkcija gustoće vjerojatnosti, kraće PDF prema eng. *probability density function* neke varijable, opisuje relativnu vjerojatnost da promatrana varijabla (koncentracija) uzme neku vrijednost. Koncept PDF-ova i CDF-ova prema eng. *cumulative density function* osnova je za definiciju bilo kojeg rizika u praksi. Jednom kada je definiran proizvoljan broj n apsolutnih momenata koncentracije zagađenja, PDF se može rekonstruirati iz njih putem inverzije momenata [11] gdje se zapravo vidi direktna primjena ovako dobivenih momenata. Traženi PDF se može dobiti na osnovi principa maksimalne entropije [12] ili prilagodbom teorijske distribucije putem preklapanja momenata prema (3). Potonji postupak je primijenjen korištenjem beta-distribucije [13, 14] te je radi jednostavnosti, implementiran u računalnu aplikaciju CPoRT. Primjer rezultata je dan u nastavku (slika 3.).

2.3 Računalna aplikacija za primjenu razvijene metodologije - CPoRT

CPoRT je zamišljen da bude jednostavan alat (eng. *screening tool*) za brzu detekciju potencijalnog rizika, definiranog kao prekoračenje dopuštenih vrijednosti koncentracija pojedine tvari. Aplikacija predstavlja krajnji proizvod projekta, *Procjena rizika od zagađenja uzrokovanih rijekama i ispustima u priobalju*, a koji je implementirao razvijenu metodologiju izračuna statističkih momenata i pripadajućih PDF-ova u odabranim točkama. Cilj je aplikacije bio, osim brze procjene, podignuti razinu svijesti o važnosti upravljanja količinom zagađenja koja ulazi putem rijeka te aktivno uključivanje relevantnih dionika u proces kako bi ima kasnije donošenje odluka bilo olakšano. Prototip aplikacije i grafičkog sučelja (slika 2.) izveden je u programskom paketu MA-TLAB 2012a [15].

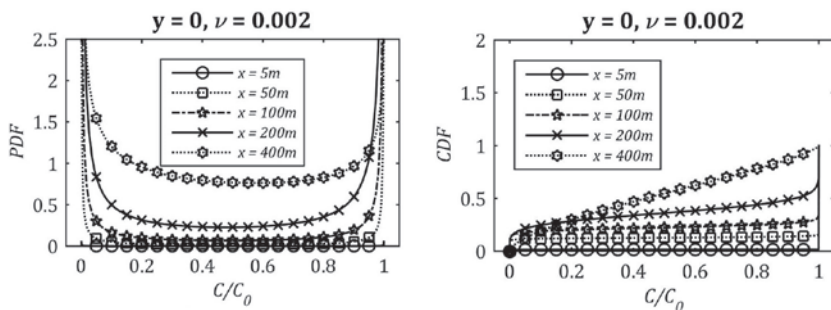


Slika 2. Grafičko sučelje CPoRT aplikacije, s prikazom integriranog rezultata za srednju vrijednost koncentracije

Grafičko sučelje aplikacije zamišljeno je kao više prozora od kojih je prvi i glavni ujedno početni prozor aplikacije. U sklopu tog prozora nalazi se prostor za upravljanje parametrima simulacije, dio vezan uz prikaz ploha i grafova te izborna traka sa standardnim opcijama za Windows aplikacije.

3 Rezultati

U nastavku su dani primjeri rezultata u obliku izračunanog PDF-a i CDF-a (slika 3) korištenjem prvog i drugog momenta te beta-distribucije kako je to rečeno u poglavlju 2, te detaljno opisano u [9].



Slika 3. Primjer izračunanog PDF-a i CDF-a, prema [9]

Nastavno je dan i primjer rezultata u kontekstu implementirane primjene razvijene metodologije uz pomoć CPoRT aplikacije. Dakle, izvedena je procjena rizika od prekoračenja granične koncentracije ukupnog dušika (prema hrvatskoj regulativi 1 mgN/l) na primjeru pilot – područja – ušća rijeke Žrnovnice (slika 4) gdje je početna koncentracija ukupnog dušika iznosila 1,42 mg/l (prema smjernicama [16]).



Slika 4. Primjer proračuna vjerojatnosti prekoračenja granične koncentracije ukupnog dušika za lokaciju ušća rijeke Žrnovnice (preuzeto iz [17])

4 Zaključak i buduće smjernice

U radu je prikazano rješenje i računalna aplikacija za 2D problem stacionarnog i nereaktivnog pronosa zagađenja unesenog rijekama u ušće, kojima nedostaju sposobnosti detaljnog i preciznijeg proračuna koji uobičajeno imaju hidrodinamički modeli. Ipak, zahvaljujući svojoj jednostavnosti i oslanjanju na razvijeni analitički pristup, proračun se izvodi u nekoliko minuta s minimalnim brojem potrebnih ulaznih parametara. CPoRT zbog toga nalazi svoje mjesto kao aplikacija za edukaciju, ali i brzu procjenu stanja nekog područja te pomoć donositeljima odluka pri shvaćanju glavnog problema. Nastavak istraživanja uključuje prostornu integraciju statističkih parametara koja će omogućiti novi pristup pri definiranju stupnja razrijeđenosti zagađenja te parcijalnog opterećenja dijela akvatorija s obzirom na ulaznu masu zagađivača.

Literatura

- [1] Cohen, J.F., Small, C., Mellinger, A., Gallup, J., Sachs, J.: Estimates of coastal populations, *Science*, 80 (1997) 278, pp. 1211–1212, doi:10.1126/science.278.5341.1209c.
- [2] Rabalais, N.N., Turner, R.E., Díaz, R.J., Justić, D.: Global change and eutrophication of coastal waters, *ICES J Mar Sci*, 66(2009), pp. 1528–1537.
- [3] Decision C.: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Off J Eur Communities*, 1 (2000), pp. 1–33.
- [4] Decision C.: Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council. *Off J Eur Union*, 164 (2008), pp. 19–40.

- [5] Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., et al.: Nitrogen cycles : past, present and future, *Biogeochemistry*, 70 (2004), pp. 153–226, doi:10.1007/s10533-004-0370-0.
- [6] Sullivan, P.J.: The influence of molecular diffusion on the distributed moments of a scalar PDF. *Environmetrics*, 15 (2004), pp. 173–191, doi:10.1002/env.633.
- [7] Andricevic, R.: Exposure concentration statistics in the subsurface transport. *Adv Water Resour*, 31 (2008), pp. 714–725, doi: 10.1016/j.advwatres.2008.01.007.
- [8] CPoRT web n.d. <http://www.cpothr.com>.
- [9] Galešić, M., Andričević, R., Gotovac, H., Srzić, V.: Concentration statistics of solute transport for the near field zone of an estuary. *Adv Water Resour*, 94 (2016), pp. 424–440. doi:10.1016/j.advwatres.2016.06.009.
- [10] Galešić, M., Andričević, R., Divić, V., Mateus, M., Pinto, L.: Potential data used for validation of concentration statistics obtained using analytical model for conservative transport in an estuary. *EGU Gen. Assem. Conf. Abstr.*, 18 (2016).
- [11] Sullivan, P.J., Ye, H.: Moment inversion for contaminant concentration in turbulent flows. *Can Appl Math Q*, 4 (1996), pp. 301–10.
- [12] Gotovac, H., Gotovac, B.: Maximum entropy algorithm with inexact upper entropy bound based on Fup basis functions with compact support. *J Comput Phys*, 228 (2009), pp. 9079–9091, doi:10.1016/j.jcp.2009.09.011.
- [13] Chatwin, P.C., Lewis, D.M., Mole, N.: Practical statistical models of environmental pollution. *Math Comput Model*, 21 (1995), pp. 11–4.
- [14] Schwede, R.L., Cirpka, O.A., Nowak, W., Neuweiler, I.: Impact of sampling volume on the probability density function of steady state concentration. *Water Resour Res*, 44 (2008), pp. 1–16, doi:10.1029/2007WR006668.
- [15] Mathworks, Matlab 2012.
- [16] Grizzetti B., Bouraoui, F.: Assessment of Nitrogen and Phosphorus Environmental Pressure at European Scale. 2006.
- [17] Galešić, M., Andričević, R., Divić, V., Šakić Trogrlić, R.: New screening tool for obtaining concentration statistics of pollution generated by rivers in estuaries. 15th Conf. Environ. Sci. Technol. CEST 2017, 2017.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Primijenjena matematika

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.20>

Rješavanje SPRP multirezolucijskim postupkom uz primjenu trostruke baze ABF

Nives Brajčić Kurbaša, Blaž Gotovac

Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
kontakt: nives.brajcic@gradst.hr

Sažetak

Atomske bazne funkcije (ABF) posjeduju svojstvo univerzalnosti vektorskog prostora kao klasične bazne funkcije i svojstvo finitnosti (konačna duljina nosača) kao splineovi te na taj način popunjavaju skup elementarnih funkcija. U ovom radu ukratko su opisana svojstva eksponencijalnih ABF $EFup_n(\xi, \omega)$, koji za razliku od algebarskih ABF $EFup_n(\xi)$, sadrže parametar ili frekvenciju ω koja im omogućava dodatna aproksimacijska svojstva. Problem izbora vrijednosti parametra ω u numeričkoj analizi riješen je primjenom tzv. trostruke baze. Primjena atomskih baznih funkcija $EFup_n(\xi, \omega)$ ilustrirana je na primjeru rješavanja singularno perturbiranog rubnog problema (SPRP) i to korištenjem trostruke baze u metodi kolokacije uz primjenu multirezolucijskog postupka.

Ključne riječi: ABF eksponencijalnog tipa, frekvencija, trostruka baza, SPRP

Solving the SPRP by using a triple base ABF

Abstract

Atomic basis functions (ABF) possess the property of universality of the vector space as a classical basis functions and finiteness as splines, and thus filling a set of elementary functions. In this paper basic properties of exponential ABF $EFup_n(\xi, \omega)$ are described briefly, which, unlike the algebraic ABF $EFup_n(\xi)$, contain a parameter or frequency ω which gives them additional approximation properties. The problem of selecting parameter value ω in numerical analysis has been solved using the so-called triple base. The application of the basis function $EFup_n(\xi, \omega)$ is illustrated in the example of solving the singularly perturbed boundary problem (SPBP) by using a triple base in the collocation method using the multi-resolution procedure.

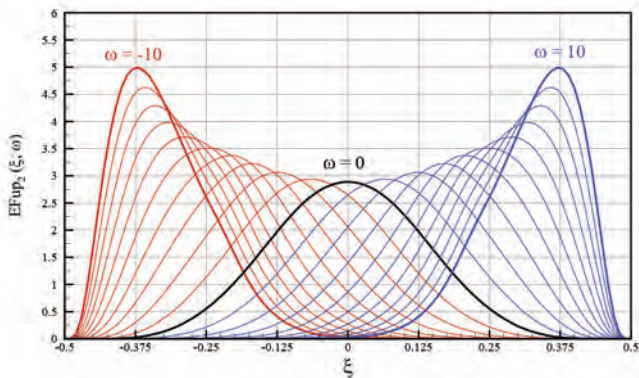
Keywords: ABF of exponential type, frequency, triple base, SPBP

1 Uvod

Atomske bazne funkcije (ABF) eksponencijalnog tipa $EFup_n(\xi, \omega)$ finite su funkcije iz klase C^∞ s kompaktnim nosačem, a elementi su linearnog vektorskog prostora Eup_n [1, 2, 9], te zadržavaju sva svojstva materinske bazne funkcije $Eup_n(\xi, \omega)$. Indeks n označava najveći stupanj eksponencijalnog polinoma koji se može prikazati točno u obliku linearne kombinacije međusobno pomaknutih funkcija $EFup_n(\xi, \omega)$ na odsječku duljine, $\Delta\xi_n = 2^{-n}$ [1, 2].

ABF eksponencijalnog tipa u odnosu na bazne funkcije algebarskog tipa sadrže i parametar ω , ili analogno trigonometrijskim funkcijama, frekvenciju ω . S obzirom na apsolutnu vrijednost parametra ili frekvencije ω bazne funkcije mijenjaju svoj oblik, odnosno imaju otklon u lijevu ili desnu stranu ovisno o njegovom predznaku (slika 1.). Upravo ovo svojstvo čini ih “podatljivima” i daje im prednost u odnosu na algebarske ABF, i to naročito u opisivanju rješenja s velikim gradijentima gdje su općenito algebarske bazne funkcije podložne tzv. Gibsovom efektu.

Za vrijednost parametra $\omega = 0$ eksponencijalne ABF “prelaze” u algebarske ABF, tj. $EFup_n(x, 0) = Fup_n(x)$.



Slika 1. Funkcija za različite vrijednosti parametra

Međutim, u praktičnoj primjeni eksponencijalnih ABF nema, općenito gledano, jedinstvenog kriterija za izbor parametra u problemima aproksimacije zadane funkcije i rješavanju diferencijalnih jednadžbi ako on nije zadan unutar same jednadžbe. S obzirom na to da eksponencijalne ABF točno opisuju eksponencijalne polinome za koje vrijedi

$$y' = \omega \cdot y \rightarrow \omega = y'/y \quad (1)$$

gdje je eksponencijalni polinom, jedan od kriterija izbora parametra u određenim primjerima aproksimacije funkcije je upravo (1), dok u drugim primjerima može pomoći

u određivanju intervala vrijednosti parametra. Kada su problemi opisani diferencijalnom jednačbom, parametar ω određuje se iz fizikalnih karakteristika problema.

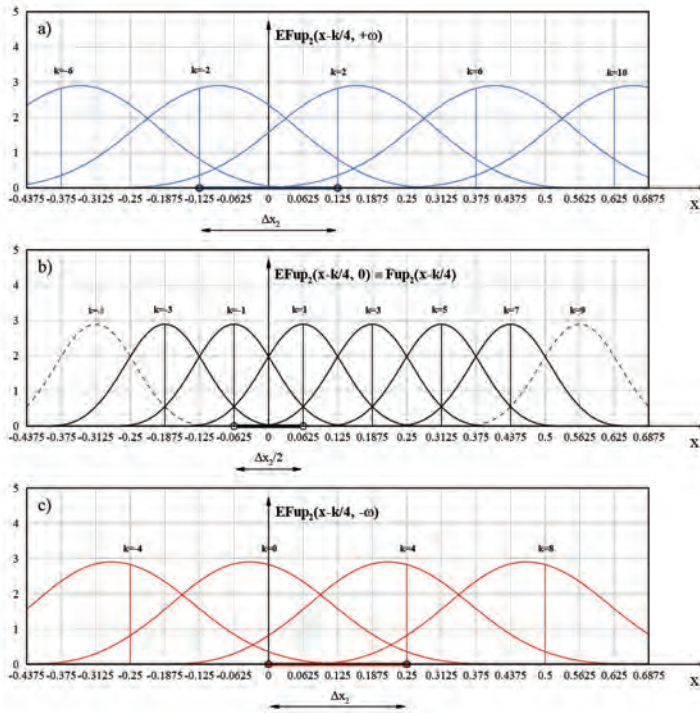
2 Raspored baznih funkcija u trostrukoj bazi ABF

Budući da ne postoji jedinstveni kriterij za izbor parametra ω , formira se baza u vektorskom potprostoru koji sadrži eksponencijalne ABF s pozitivnom i negativnom vrijednosti parametra ω tj. bazne funkcije $EFup_n(x, +\omega)$ i $EFup_n(x, -\omega)$. Time se postiže općenitost u smislu izbora predznaka frekvencije na razini dimenzije odabranog potprostora. Također, osim eksponencijalnih ABF formirana baza sadrži i algebarske ABF $Fup_n(x)$ kako bi se ispunio kriterij "razvoja jedinice". Naime, vektorski prostor EUP_n koji tvore ABF $EFup_n(x, \omega)$ ima stanovite sličnosti s vektorskim prostorom trigonometrijskih funkcija. Particija jedinice u oba prostora moguć je samo u slučaju $\omega = 0$.

Tako formirana baza, [1], koja uz eksponencijalne ABF $EFup_n(x, +\omega)$ i $EFup_n(x, -\omega)$ sadrži i algebarske ABF $Fup_n(x)$, naziva se trostruka baza. Primjerice za $n = 2$, približno rješenje problema tražit će se u sljedećem obliku (slika 2.):

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x) = & \sum_{i=-6}^{n+6,4} A_i \cdot EFup_2\left(\frac{x}{x_2} - \frac{i}{4}, +\omega\right) + \sum_{j=-5}^{n+5,2} B_j \cdot EFup_2\left(\frac{x}{2 \cdot x_2} - \frac{j}{4}, 0\right) \\ & + \sum_{k=-4}^{n+4,4} C_k \cdot EFup_2\left(\frac{x}{x_2} - \frac{k}{4}, -\omega\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Izraz (2) predstavlja linearnu kombinaciju međusobno pomaknutih baznih funkcija $EFup_2(x, \omega^*)$, $\omega^* = +\omega, 0, -\omega$ gdje su istovrsne bazne funkcije međusobno pomaknute za duljinu karakterističnog odsječka Δx_2 , pri tome je duljina karakterističnog odsječka algebarskih, ili točnije eksponencijalnih ABF za vrijednost parametra $\omega = 0$, upola manja od baznih funkcija $EFup_2(x \pm \omega)$, zbog čega je broj baznih funkcija u bazi dvostruko veći (slika 2.). Prostoru koji sadrži pozitivne i negativne frekvencije potrebno je dodati još toliko baznih funkcija kako bi dimenzija 2^n porasla na 2^{n+1} . Međusobni razmak tjemena baznih funkcija je prema tome $\Delta x_v = \Delta x_2/4$.



Slika 2. Raspored baznih funkcija $EFup_2(x, \omega^*)$ u trostrunoj bazi: a) Bazne funkcije s pozitivnom frekvencijom $\omega < 0$, b) Bazne funkcije s neutralnom frekvencijom $\omega = 0$, c) Bazne funkcije s negativnom frekvencijom $\omega > 0$

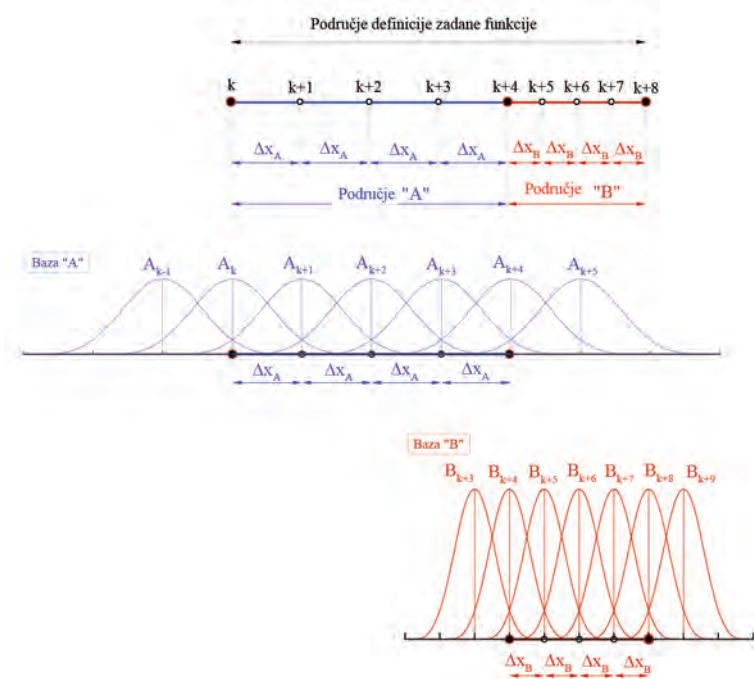
Jednadžbe za određivanje nepoznatih koeficijenata u linearnoj kombinaciji (2) su sljedeće:

- Za bazne funkcije s tjemenima u području i na rubu područja u kolokacijskim točkama zadovoljavaju se vrijednosti zadane funkcije (ili diferencijalna jednadžba).
- Za bazne funkcije čija su tjemena izvan područja dodatne uvjetne jednadžbe na oba ruba su zadovoljavanje vrijednosti prve derivacije zadane funkcije (rubnog uvjeta) na pojedinom rubu, a preostale jednadžbe su rekurzivne formule iz [1].

2.1 Multirezolucijski postupak

U pojedinim problemima, bilo da se radi o aproksimaciji funkcije ili rješavanju diferencijalne jednadžbe, grafovi rješenja na većem dijelu područja mogu biti jednostavne funkcije (npr. konstanta ili polinom nekog nižeg stupnja) koje bi se mogle točno opisati i s malim brojem baznih funkcija, dok tek na malom dijelu područja mogu biti složene funkcije s izraženim gradijentima gdje je potreban veliki broj baznih funkcija kako bi se rješenje aproksimiralo sa zahtjevanom točnošću.

U takvim slučajevima, umjesto povećavanja broja baznih funkcija na cijelom području, što je s aspekta trajanja proračuna skup postupak, pogodne su tzv. multirezolucijske metode.



Slika 3. Raspored baznih funkcija $EFup^2(x,0)$ u multirezolucijskoj metodi

Kod multirezolucijske metode područje se, ovisno o obliku rješenja, dijeli na određeni broj intervala. Na pojedinom intervalu bira se odgovarajuća podjela područja kao i prikladna vrijednost parametra ω , a u točki "spoja" između dvaju intervala postavlja se uvjet neprekinutosti derivacija.

Na slici 3. prikazan je raspored baznih funkcija u multirezolucijskom postupku za bazne funkcije $Fup_n(x)$ iz izraza (2). Područje definicije zadane funkcije podijeljeno je na dva intervala, A i B.

3 Singularno perturbirani rubni problem (SPRP)

Primjena eksponencijalnih splineova, kao "srodnih" eksponencijalnih funkcija u numeričkoj analizi, često se u literaturi pokazuje na primjeru tzv. singularno perturbiranog rubnog problema (SPRP) (npr. [3-5]), koji se često javlja u mnogim područjima dinamike fluida (prijelaz iz Navier-Stokseove u Eulerovu jednadžbu u modelima toka

fluida). SPRP je problem konvekcije-difuzije ili reakcije-difuzije s difuznim koeficijentom vrlo blizu nule što daje visoke gradijente blizu granice područja.

Pretpostavlja se da je zadan jednodimenzionalni SPRP:

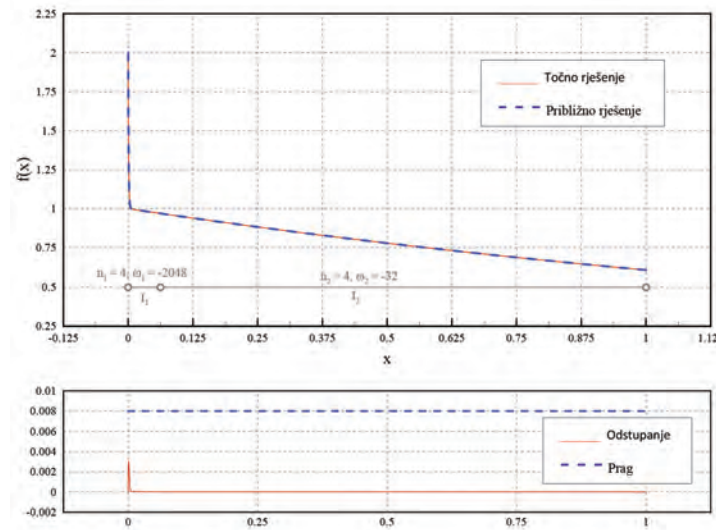
$$\begin{aligned} \varepsilon \cdot u''(x) + (1+x)^3 \cdot u'(x) &= f(x) \\ u(0) &= 2 \\ u(1) &= 0,125 \cdot e^{-3,75/\varepsilon} + e^{-0,5} \end{aligned} \tag{3}$$

s poznatim analitičkim rješenjem

$$u(x) = \frac{1}{(1+x)^3} e^{(1-(1+x)^4)/(4-\varepsilon)} + e^{-x/2} \tag{4}$$

Na slici 4. prikazana je usporedba analitičkog rješenja (4) i aproksimacije dobivene metodom kolokacije u točki pomoću trostruke baze (2) multirezolucijskom metodom. Područje je podijeljeno na dva intervala $I_1 = [0, 0.0625]$ i $I_2 = [0.0625, 1]$. Prvi interval I_1 podijeljen je na 4 karakteristična odsječka i odabrana je maksimalna vrijednost parametra, a da se ne prekorači točnost računala $\omega = -2048$. Drugi interval I_2 je također podijeljen na 4 karakteristična odsječka, a odabrana je minimalna vrijednost parametra $\omega = -32$ s obzirom na duljinu karakterističnog odsječka.

U literaturi [5] je pokazano rješenje problema (3) za vrijednost parametra $\varepsilon = 10^{-3}$ dobiveno korištenjem eksponencijalnih splineova $E_4(\xi, \omega)$ kombiniranjem dva pristupa za rješavanje SPRP ("fitted" operatori konačnih razlika i po dijelovima ujednačene "fitted" mreže) te se usporedbom rješenja jasno može uočiti prednost prikazanog postupka.



Slika 4. Singularno perturbirani rubni problem

4 Zaključak

Pokazana je prednost eksponencijalnih ABF u odnosu na one algebarskog tipa, posebno u rješavanju problema s velikim gradijentima jer jedino one neće davati izražene oscilacije numeričkog rješenja. Naime, eksponencijalne ABF posjeduju dodatno svojstvo "podatljivosti" koje im omogućava parametar ili frekvencija ω . Primjena eksponencijalnih ABF $EFup_n(\xi, \omega)$ pokazana je na primjeru rješavanja singularno perturbiranog rubnog problema korištenjem trostruke baze u metodi kolokacije s multirezolucijskim pristupom.

Literatura

- [1] Brajčić Kurbaša, N.: Eksponencijalne atomske bazne funkcije: Razvoj i primjena, Doktorska disertacija, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, 2016.
- [2] Gotovac, B.: Numeričko modeliranje inženjerskih problema pomoću glatkih finitnih funkcija. Doktorska disertacija, Fakultet građevinarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1986
- [3] Kadalbajoo, M.K., Aggarwal, V.K.: Fitted mesh B-spline collocation method for solving self-adjoint singularly perturbed boundary value problems. *Applied Mathematics and Computation*, 161 (2005), pp. 973–987.
- [4] Marušić M., Rogina M.: A Collocation Method for Singularly Perturbed Two-point Boundary Value Problems with Splines in Tension. *Advances in Computational Mathematics*, 6 (1996), pp. 65-76.
- [5] Radunović, D.: Multiresolution exponential B-splines and singularly perturbed boundary problem. *Numer. Algor.*, 47 (2008), pp. 191–210.
- [6] Rvachev, V.L., Rvachev, V.A.: Nonclassical methods of approximation theory in boundary value problems. Kiev: Naukova Dumka, 1979

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.22>

Konstrukcija maksimalno balansirane povezane particije u grafu

Anton Vrdoljak

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet
kontakt: anton.vrdoljak@gfmo.ba

Sažetak

Implementacije mnogih metoda diskretne matematike, posebice teorije grafova i teorije kompleksnih mreža, te metode rudarstva podataka, imaju važnu ulogu u rješavanju NP – teških problema iz područja kombinatorne optimizacije. Dosadašnja istraživanja su pokazala kako značajnu ulogu o ovim problemima imaju istraživanja važnosti pojedinog vrha unutar grafa, te konstruiranje maksimalno balansirane particije u grafu. Takvi problemi u praksi nisu rijetki, ali nisu ni predmet istraživanja isključivo matematičara, već ih izučavaju i istraživači iz drugih područja znanosti, inženjerstva, ekonomije, obrazovanja.

Ključne riječi: graf, maksimalno balansirana povezana particija u grafu, pohlepni algoritam, cluster analiza

Structure of maximally balanced connected partition in graph

Abstract

The implementation of various discrete mathematics methods, especially graphs, complex network theory, and the data mining methods, play an important role in solving NP–difficult problems in the field of combinatorial optimization. Previous research has shown that these issues are greatly influenced by study of the importance of a single vertex within the graph, and the design of maximally balanced connected partitions in graph. These problems are not rare in practice, and are not studied solely by mathematicians, but also by researches from other areas of science, engineering, economy, and education.

Keywords: graph, maximally balanced connected partition in graph, greedy algorithm, cluster analysis

1 Uvod

1.1 Uvodne definicije

Mnogi se problemi u suvremenoj znanosti mogu modelirati uz pomoć grafova, i vrlo često se svode na nalaženje putova unutar grafova. Ugrubo, graf se može predstaviti kao familija točaka, koje nazivamo vrhovima, zajedno sa spojnicama između točaka, koje nazivamo bridovima. Precizna definicija grafa glasi [1]:

Graf je uređena trojka $G = (V, E, \varphi)$, gdje je V neprazan skup vrhova, E skup bridova koji je disjunktan s V , a φ funkcija koja svakom bridu iz E pridružuje dva, ne nužno različita vrha iz V . Graf često zapisujemo kao par $G = (V, E)$ ili samo G .

Svaki brid $e \in E$ spaja dva vrha $u, v \in V$. Kažemo još kako su u i v krajevi brida e , te da su u i v susjedni vrhovi, i pišemo $e = uv$. Bridovi čiji se krajevi podudaraju zovu se petlje, a bridovi kod kojih su krajevi različiti zovu se pravi bridovi ili karike. U ovom radu ćemo proučavati samo konačne grafove. Konačan graf je onaj u kojem su V i E konačni skupovi. Graf je jednostavan ako nema petlje i ako ne postoje dva brida koji spajaju isti par vrhova [2]. Graf koji može sadržavati petlje i višestruke bridove nazivamo pseudograf.

Podgraf grafa $G = (V, E)$ je svaki graf $G' = (V', E')$ sa svojstvom: $V' \subseteq V$ i $E' \subseteq E$. To još zapisujemo s $G' \subseteq \text{Podgraf } G'$ grafa G sa svojstvom $V(G') = V(G)$ naziva se **razapinjući podgraf** grafa G . Također, neka je $V' \subseteq V$ neprazan podskup vrhova grafa G , podgraf grafa G čiji je skup vrhova V' , a skup bridova je podskup skupa bridova grafa G i sastoji se od onih bridova iz E čija su oba kraja u V' naziva se **podgraf induciran** s V' . Nadalje, put se definira kao poseban slučaj šetnje [1, 2].

Šetnja W u grafu $G = (V, E)$ je netrivialni konačni niz $v_0 e_1 v_1 e_2 v_2 \dots v_{m-1} e_m v_m$, čiji su članovi naizmjenice vrhovi i bridovi grafa. Vrhovi su na početku i na kraju šetnje. Vrhovi koji nisu na početku ili kraju, zovu se **unutarnji vrhovi**. **Duljina šetnje** k je broj bridova u šetnji. Ako su svi vrhovi u šetnji međusobno različiti, šetnju nazivamo **put**.

Pseudograf je **povezan** ako i samo ako postoji šetnja između bilo koja dva njegova vrha.

Inače, pišemo $v_1 \sim v_2$ ako postoji šetnja u grafu koja povezuje vrhove v_1 i v_2 tog grafa. Budući da je \sim relacija ekvivalencije na skupu V svih vrhova grafa G , na skupu V postoji particija tog skupa na disjunktne, neprazne pod skupove – klase (ekvivalencije).

Graf G u kojem se skup vrhova može particionirati u k nezavisnih skupova zovemo **k -partitivnim** ili **višepartitivnim** grafom s k nezavisnih skupova.

k -partitivni graf G je **potpun** ako za bilo koja dva vrha grafa G vrijedi da su susjedni ako i samo ako pripadaju različitim klasama particije skupa vrhova V grafa G .

1.2 Matematička definicija problema

Sada ćemo dati matematičku definiciju problema:

Neka je $G = (V, E)$, $V = \{1, 2, \dots, n\}$ povezan graf i $|E| = m$. Neka su w_i težine u vrhovima. Za proizvoljan $V' \subseteq V$ uvedimo oznaku $w(V')$ za sumu težina svih vrhova (čvorova) iz V' , tj.

$$w(V') = \sum_{i \in V'} w_i \quad (1)$$

Problem maksimalno balansirane povezane particije u grafu jest određivanje particije skupa vrhova iz $V' \subseteq V$ u dva disjunktna, neprazna skupa, V_1 i V_2 , takva da su podgrafovi grafa G inducirani s V_1 i V_2 povezani, a sume težina vrhova iz V_1 i V_2 su po vrijednosti što bliže jedna drugoj, tj. razlika između suma težina je najmanja moguća.

2 Algoritmi za konstrukciju maksimalno balansirane povezane particije

U ovom radu primijenjene su dvije strategije (algoritma, tehnike) za konstrukciju maksimalno balansirane povezane particije u grafu: **pohlepni algoritam**, tzv. *Greedy*, i **cluster analiza**.

2.1 Pohlepni algoritam

Izbor pohlepnog algoritma se nametnuo zbog činjenice što takvi algoritmi koriste metaheuristiku za rješavanje problema, te su obično jednostavnog oblika i daju brzu aproksimaciju najboljega rješenja. Prema Singeru [3], opći oblik pohlepnog algoritma je:

```
procedure greedy (C : skup; var S : skup; var OK : boolean)
    { C je u početku skup svih raspoloživih kandidata. }
    { U skupu S akumuliramo rješenje problema. }
    { OK kaže da li je nađeni S rješenje. }
```

begin

S := 0;

while not rješenje(S) **and** (C ≠ ∅) **do**

begin

 x := element iz C koji maksimizira vrijednost izbor(x);

 C := C \ {x};

if dopustivo(S ∪ {x}) **then** S := S ∪ {x};

end;

OK := rješenje(S);

end.

Nadalje, isti autor [3] ističe kako pohlepni algoritam **ne** mora naći rješenje problema. Čak i ako ga nađe, to rješenje **ne** mora biti optimalno, jer pohlepni algoritam nigdje ne koristi funkciju cilja, već samo funkciju izbora. Da bi ovakvo nađeno rješenje bilo i optimalno rješenje, treba **dokazati** da pohlepni algoritam korektno rješava problem optimizacije.

2.2 Cluster analiza

Prema Vukičeviću [4] Cluster analiza nije statistička tehnika, već skup metoda (algoritama) koji nam omogućuju da klasificiramo promatrane podatke. Što je promatrana klasa manja, to su razlike među objektima manje, a što je promatrana klasa veća, to su razlike među objektima veće. Dakle, možemo reći kako Cluster analiza za svrhu ima otkrivanje strukture nekog početnog skupa podataka (npr. gradiva ili sadržaja nekog predmeta na studiju) njegovim dekomponiranjem (particioniranjem) u manje, homogenije podskupove.

Prvi problem Cluster analize je kako utvrditi (tj. brojčano izraziti) sličnost između dvaju objekata a i b opisanih nekim svojstvima s_1, s_2, \dots, s_n . Neka je vrijednost svojstva s_i za objekt a jednaka x_i , a za objekt b jednaka y_i . Tada se neka od *udaljenosti* (s obzirom na sličnost) objekata a i b može mjeriti na više načina.

1) Euklidska udaljenost:

$$d(a,b) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

2) Kvadrirana euklidska udaljenost:

$$d(a,b) = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (3)$$

3) Manhattan ili taxi udaljenost:

$$d(a,b) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (4)$$

4) Čebiševljeva udaljenost:

$$d(a,b) = \max |x_i - y_i| \quad (5)$$

5) Minkowski udaljenost:

$$d(a,b) = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p} \quad (6)$$

6) Udaljenost s obzirom na postotak neslaganja:

$$d(a,b) = \text{card}\{i : x_i \neq y_i\} \quad (7)$$

U ovom radu je korištena samo euklidska udaljenost. Nadalje, potrebno je utvrditi kako formirati klustere, te kako utvrditi konačan broj klastera. Prema matematičkoj definiciji problema, konačan broj klastera je dva. Inače, uvriježeno je kako istraživač sam treba prosuditi, u kontekstu svog istraživanja, koji broj klastera i s kakvim karakteristikama mu je potreban. Dakle, preostaje riješiti pitanje utvrđivanja udaljenosti dvaju skupova objekata, a postoji nekoliko načina na koje to možemo učiniti, primjerice, 1) jednostrukom povezanošću:

$$d(A,B) = \min\{d(a,b) : a \in A, b \in B\} \quad (8)$$

2) potpunom povezanošću:

$$d(A,B) = \max\{d(a,b) : a \in A, b \in B\} \quad (9)$$

3) neuteženom prosječnom povezanošću:

$$d(A,B) = \left(\sum_{a \in A, b \in B} d(a,b) \right) / (\text{card}A \cdot \text{card}B) \quad (10)$$

Nakon što je odabran način na koji ćemo mjeriti udaljenost među skupovima objekata, te nakon što je utvrđen konačan broj klastera, prema [4] primijenit ćemo sljedeći algoritam:

- 1) Ako se u familiji skupova nalaze barem dva skupa,
 - 1.1) pronađi dva skupa kojima je udaljenost najmanja
 - 1.2) smjesti ta dva skupa u isti klaster
 - 1.3) izbacij ta dva skupa iz familije promatranih skupova
 - 1.4) u familiju promatranih skupova dodaj skup koji je unija dva izbačena skupa
 - 1.5) vrati se na liniju 1).
- 2) Ako se u familiji skupova nalazi samo jedan skup,
 - 2.1) kraj algoritma.

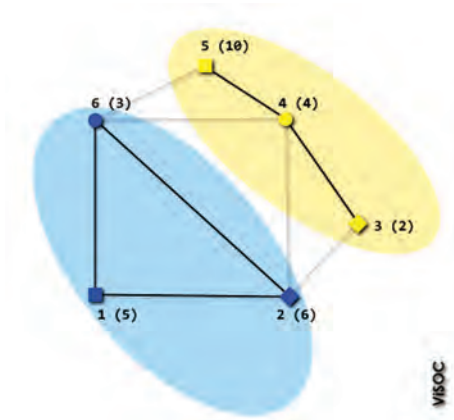
Važno je napomenuti kako različiti izbori računanja udaljenosti među objektima i među skupovima rezultiraju različitim klasteriranjem objekata. Jedan primjer tehnike algoritma cluster analize prikazan je na slici 1.



Slika 1. Tehnika algoritma cluster analize

3 Implementacija

Postupak rješavanja nekog problema uz uporabu računala obično se sastoji od sljedeće tri faze: **formulacija problema**, odnosno formiranje matematičkog problema, **definicija** postupka, odnosno **algoritma rješavanja**, koji razumijeva precizan niz radnji koje treba obaviti kako bi se došlo do rješenja problema, te **implementacija**, odnosno **programiranje**, danog algoritma u nekom od (viših) programskih jezika. Prilikom definiranja algoritma preporučuje se uzeti u obzir da će taj problem biti riješen uz pomoć računala, i da će taj algoritam sadržavati jednu ili više **numeričkih metoda**, pa se trebaju osigurati određeni ulazni podaci, izvršiti odgovarajuća testiranja i predvidjeti u kojoj će formi biti prezentirani rezultati proračuna. Jasno je kako postoji niz međudjelovanja ovih triju faza, jer kako se program razvija, dobiva se sve više informacija o problemu koje mogu sugerirati određene promjene u formulaciji problema, u usvojenom algoritmu, ili u programu. Implementacija algoritama za konstrukciju maksimalno balansirane povezane particije u grafu izvedena je u objektno orijentiranom programskom jeziku C#, unutar softverskog paketa Microsoft Visual Studio 2015. Izrađen je programski modul GC-maxPart, prema shemi [8], koji u pripremnoj fazi konstruira graf, tj. zadaje vrhove i bridove (veze) te težine u vrhovima. Nakon toga slijedi izvršna faza u kojoj će korisnik imati mogućnost konstrukcije maksimalno balansirane povezane particije u grafu pomoću dviju (u točki dva) opisanih strategija (pohlepni algoritam i cluster analiza) i imati, na samom kraju, mogućnost validacije dobivenih rezultata (ispitivanje je li dobivena particija odgovarajuća) kao i evaluacije čitavog postupka. Dobiveni rezultati nedvojbeno pokazuju kako su implementirane modifikacije strategija (tehnika) pogodne za konstrukciju maksimalno balansirane povezane particije u grafu. Na slici 2. prikazan je jednostavan primjer (malog) grafa i maksimalno balansirane povezane particije u njemu.



Slika 2. Graf i rješenje problema maksimalno balansirane povezane particije u njemu [8]

4 Zaključak

Problem konstrukcije maksimalno balansirane povezane particije u grafu vezan je uz teoriju grafova, a ima čestu primjenu u znanosti, posebice u inženjerstvu, ekonomiji i, u posljednje vrijeme sve češće, obrazovanju (organiziranje lekcija tečaja u dvije povezane cjeline koje su ujednačene po težini [8]). Budući da kardinalnost skupa vrhova V u grafu G može biti velika i budući da je poznato kako se problem maksimalno balansirane povezane particije u grafu karakterizira kao NP-težak problem (vrlo zahtjevan za rješavanje), logično je bilo odlučiti se pribjeći korištenju pohlepnih algoritama i tehnika cluster analize u konstrukciji. Provedena implementacija, u obliku programskog modula GCmaxPart, daje izuzetno efikasne konstrukcije u razumnom vremenu (složenost algoritma je $O(n^2)$).

Literatura

- [1] Kalebić, F., Mandić, J., Vukičević, D., Braić, S.: Prebrojavanje savršenih sparivanja, Hrvatski matematički elektronički časopis math.e, 27 (2009).
- [2] Divjak, B., Lovrenčić, A.: Diskretna matematika s teorijom grafova, Sveučilište u Zagrebu, FOI, Varaždin, 2005.
- [3] Singer, S.: Složenost algoritama, Sveučilište u Zagrebu, PMF – Matematički odjel, Zagreb, 2005.
- [4] Vukičević, D.: Uvod u statistiku, Sveučilište u Splitu, Split, 2005.
- [5] MacKay, D.: Information Theory, Inference, and Learning Algorithms, Version 7.2, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

- [6] McMillan, M.: Data Structures and Algorithms Using C#, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [7] Newman, M.: Networks, An Introduction, Oxford University Press, Oxford, 2010.
- [8] Matić, D., Božić, M.: Rješavanje nekih organizacionih problema u nastavi primjenom pronalazjenja maksimalno balansirane povezane particije u grafu, SIMPOZIJUM Matematika i primene, Mateljević M., Beograd, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, (N61 – N67), 2012.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Materijali

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.15>

Tkaninom armirani mortovi (TRM) kao tehnika pojačavanja AB konstrukcija

Martina Carić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski Fakultet
kontakt: mcarić@grad.hr

Sažetak

Posljednjih se godina za pojačanja konstrukcija istražuju tkaninom armirani mortovi (TRM). To su kompoziti koji se sastoje od vlakana (staklenih, ugljičnih, bazaltnih, PBO) i anorganske (cementne) matrice. Nastali su iz potrebe za rješavanjem nedostataka epoksidne matrice kod vlaknima armiranih polimera (FRP-a). Anorganska matrica ima veći toplinski kapacitet, a ponašanje elementa u vlaknu nije linearno elastično. Snopovi vlakana su formirani u mreže kako bi se ostvarila povezanost s matricom. Provedeno je više istraživanja pojačanja armiranobetonskih i zidanih konstrukcija, a u ovom radu prikazana su pojačanja armiranobetonskih (AB) ploča, greda i stupova. Istaknuti su parametri koji utječu na učinkovitost kompozitnog djelovanja, a time i učinkovitost pojačanja te ponašanje pojačanih elemenata.

Ključne riječi: TRM, pojačanja, AB, vlakna, mort, tkanina

Textile reinforced mortars (TRM) as strengthening technique for reinforced concrete structures

Abstract

In the last years, textile reinforced mortars (TRM) have been studied for the strengthening of structures. TRM are composites made of fibres (glass, carbon, basalt, PBO) embedded in inorganic (cementitious) matrix. They have been developed due to fibre reinforced polymers (FRP) epoxy matrix's disadvantages. Inorganic matrix has higher thermal capacity and tensile behavior of material is non linear elastic. Fibre rovings form fabric grids in order to achieve the bond with the matrix through penetration of mortar through the fabric. Several studies have been carried out on the strengthening of reinforced concrete and masonry structures. Strengthening of reinforced concrete (RC) slabs, beams and columns is presented in this paper. Parameters that affect the effectiveness of composite action, and thus the effectiveness of strengthened elements are highlighted.

Keywords: TRM, strengthening, RC, fibres, mortar, textile

1 Uvod

U današnje vrijeme, osim izgradnje novih konstrukcija, sve je veća orijentacija inženjera na projekte sanacija i rekonstrukcija, s obzirom na strože zahtjeve normi čije uvjete starije građevine ne mogu ispuniti i s obzirom na dotrajalost i mehanička oštećenja. Jedna od dosta proučavanih i primjenjivanih tehnika pojačanja konstrukcija je upotreba FRP-a, koji se sastoje od armaturnih vlakana (staklenih, ugljičnih, aramidnih) povezanih polimernom matricom (najčešće epoksidnom smolom). Uz brojne prednosti koje ovaj tip kompozita ima, postoje nedostaci koji se najviše vežu uz svojstva matrice: loše ponašanje epoksida pri visokim temperaturama, nemogućnost nanošenja smola pri niskim temperaturama i na mokrim podlogama, manjak paropropusnosti, nekompatibilnost epoksida i podloga na koje se nanosi, visoka cijena epoksida te, kao glavni nedostatak, linearno elastično ponašanje takvih kompozita do sloma [1].

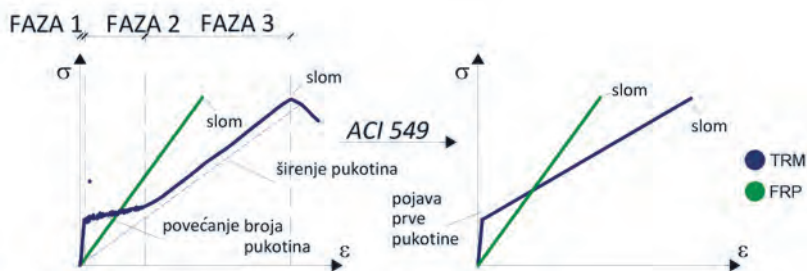
Zamjena organskog veziva anorganskim (npr. cementnim mortom) dovodi do upotrebe tkaninom armiranih mortova (eng. *textile reinforced mortars* - TRM; *mineral based composites* - MBC; *textile reinforced concrete systems* - TRC), kao rješenje navedenih problema kod epoksidne matrice. Anorganska matrica ima veći toplinski kapacitet i kompatibilnija je s betonom i žiđem, podlogama koje se pojačavaju. TRM kompoziti sastoje se od snopova vlakana raspoređenih u jednom ili više smjerova (najčešće ortogonalno) i anorganske matrice. 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 prenosi naprezanja s podloge na vlakna. Prema tome, ovisno o vrsti vlakana, postoji GTRM, CTRM, BTRM i PBOTRM. Prianjanje između vlakana i matrice postignuto je mehaničkim uklinjavanjem koji je rezultat prodiranja morta kroz razmake u mreži. Trake od polimernih vlakana nisu povoljno rješenje jer se ne može ostvariti veza između morta i vlakana [2].

Posljednjih dvadesetak godina provedeno je više istraživanja pojačanja armiranobetonskih elemenata te seizmička obnova zidanih konstrukcija te armiranobetonskih okvira s ispunom. Dosadašnja istraživanja pokazuju zadovoljavajuće rezultate, što je i razlog sve većeg broja istraživača na ovom području. Glavni aspekti pojačanja armiranobetonskih ploča, greda i stupova prikazani su u ovom radu.

2 Svojstva TRM kompozita

TRM kompoziti se postavljaju slično kao i FRP kompoziti, ručnim polaganjem (eng. *hand lay-up method*), na način da se prvo brušenjem ili pjeskarenjem pripremi površina koja se pojačava, te se nanese prvi sloj morta. Potom se nanosi sloj mreže te ponovo sloj morta. Postupak se može ponavljati ako se želi postići veći broj slojeva. Svaki sloj morta mora se nanijeti dok je prethodni sloj još svjež [2].

S obzirom na to da je primarna funkcija pojačanja preuzimanje vlačnih naprezanja, potrebno je ispitati ponašanje vlačno opterećenog TRM-a. Za razliku od linearno elastičnog FRP-a, na radnom dijagramu TRM-a mogu se uočiti tri faze [3], s prijedlogom pojednostavljenja kao bilinearnog [4] (slika 1.). Prva faza, također linearno elastična, traje do pojave prve pukotine, a vlačna naprezanja primarno preuzima matrica. U drugoj fazi se broj pukotina povećava, i krutost kompozita je smanjena. Nakon što se slika pukotina stabilizira, kompozit je u trećoj fazi koja traje do otkazivanja, a krajnja čvrstoća i modul elastičnosti najviše ovise o svojstvima tkanine.



Slika 1. Radni dijagram vlačno opterećenog TRM-a i pojednostavljenje prema ACI 549

Kako bi se osiguralo kompozitno djelovanje i samim time vlakna što više iskoristila, potrebno je ostvariti dobru vezu među vlaknima, vezu vlakana i matrice među kojima postoji mogućnost proklizavanja, što nije moguće kod FRP-a, te vezu matrice i podloge. Složenost mehanizma prijenosa opterećenja, široki raspon vrsta i gustoće vlakana te vrsta i debljina mortova kod ovakvih pojačanja uzrokuje nekoliko mogućih načina otkazivanja TRM-a: odvajanje na površini tkanine i matrice praćeno proklizavanjem i deformacijom snopova vlakana, proklizavanje tkanine unutar matrice, odvajanje kompozita od podloge koja se pojačava te slom tkanine u matrici [5, 6].

3 Pojačanja AB ploča, greda i stupova

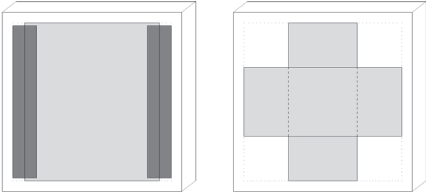
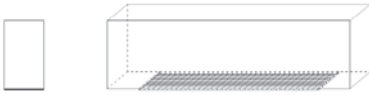
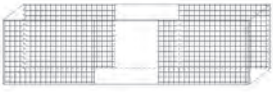
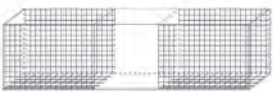

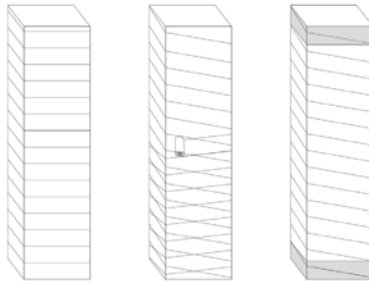
U tablici 1. prikazane su konfiguracije pojačanja AB ploča na savijanje, greda na savijanje i posmik te stupova na uzdužnu silu i savijanje. Za pojačavanje ploča može se postaviti TRM kompozit na cijeloj vlačnoj površini mreže, s preklapima ako to dimenzije ploče zahtijevaju, ili se može postaviti na efektivnim širinama na područjima većih momenata savijanja. Ispitivanjem je pokazano da je bolje ponašanje uzorka sa slojem kompozita po cijeloj površini u pogledu nosivosti, ali vlakna u glavnom smjeru su bolje iskorištena u križnoj konfiguraciji uzrokujući veće deformacije i krutost nakon pojave pukotina [7]. Pri pojačanju greda na savijanje, bolja učinkovitost ojačanja bila je kod greda s jednim slojem na vlačnom području i jednim U-slojem. Pri tome poja-

čanje nije otkazalo odvajanjem na površini beton – matrica, nego kod greda sa dva sloja na vlačnoj površini, kad je pojačanje otkazalo klizanjem tkanine u matrici [8]. Kao dodatno sidrenje mogu se postaviti i U slojevi na krajevima koji mogu povećati čvrstoću, a i promijeniti način otkazivanja, naročito ako se slom događa u tim područjima [8]. Kod pojačanja greda na poprečnu silu razlikuju se bočno postavljanje (eng. *side bonding* - SB), U-omatanje (eng. *U-wrapping* - UW) i puno omatanje (eng. *full-wrapping* - FW), pri čemu je najučinkovitiji FW, ali najrjeđe primjenjiv zbog položaja greda u konstrukcijama. Također, TRM se može postaviti konvencionalno tj. na način da se tkanina postavi u smjeru okomitom na uzdužnu os grede, ili spiralno, pod nekim kutom u odnosu na os grede. Pri ispitivanju s manjim brojem slojeva nije bilo razlika u učinkovitosti konfiguracija [9], dok je pri većem broju slojeva spiralna konfiguracija imala veću čvrstoću [10]. Mehaničko sidrenje kompozita u grede T-presjeka, usidrenim sa zakrivljenim čeličnim presjecima i vijcima, a povećava čvrstoću uzorka, to više što je razmak vijaka manji [11]. Da bi se izbjegla upotreba čelika, sidrenje se može izvesti i snopovima vlakana koji se premažu epoksidom i postave u prethodno izbušene rupe te naknadno injektiraju. Stupovi se također mogu omotavati konvencionalno, u smjeru okomitom na uzdužnu os stupa, ili spiralno, pod nekim kutom u odnosu na os. Spiralno omotavanje pokazalo se manje učinkovitim od konvencionalnog, a spiralno omotavanje pod kutom od 45° manje učinkovitim od onog pod kutom od 30° [12]. TRM pojačanja stupova mogu biti lijepljena cijelom duljinom ili samo na krajevima. U [13] oba primjera imala su jednak način otkazivanja jer se slom dogodio daleko od mjesta sidrenja.

Osim konfiguracije pojačanja, za njihovu učinkovitost važan je i odabir vlakana. PBO kompoziti imaju veću nosivost, duktilnost i apsorpciju energije od ugljičnih, te su grede ojačane PBOTRM-om otkazale na površini beton – matrica, dok su grede ojačane CTRM-om otkazale proklizavanjem tkanine u matrici. Bazaltna vlakna imala su manju učinkovitost zbog manje vlačne čvrstoće samih vlakana [8]. Stupovi ovijeni CTRM-om i GTRM-om imali su sličnu nosivost i deformaciju pri slomu, ali je CTRM ostao neoštećen zbog veće vlačne čvrstoće od staklenih vlakana [14]. Snopovi vlakana mogu biti obloženi smolom kako bi se poboljšala njihova prionjivost s matricom i prijenos sila među vlaknima. Gušća mreža vlakana može uzrokovati veću silu pri pojavi prve pukotine zbog bolje veze na površini tkanina – matrica. Vrsta morta matrice također ima važnu ulogu u povećanju čvrstoće i duktilnosti. Mort mora imati dobru obradivost, otpornost na skupljanje i viskoznost kako bi se mogao primijeniti na vertikalnim površinama. Sitni agregat omogućuje bolju impregnaciju morta u tkaninu. Uzorci stupova ovijenih TRM-om s mortom manje tlačne čvrstoće otkazali su odvajanjem kompozita od betona, a uzorci s mortom veće tlačne čvrstoće otkazali su lomom tkanine. Na promjenu moda otkazivanja utječe i debljina morta. Kod ploča pojačanih s tri sloja GTRM-a i jednim slojem CTRM-a, početna krutost prije pojave pukotina bila je veća kod tri sloja GTRM-a, upravo zbog debljine morta koji u prvoj fazi ima glavnu ulogu. Sila pri

raspucavanju bila je veća za GTRM. Nakon pojave pukotina, s potpunom aktivacijom vlakana, krutost CTRM-a bila je veća [7]. Polimerna vlakna se mogu dodati mortu kako bi se ostvarila bolja veza između slojeva, a time i veća duktilnost [9].

Tablica 1. Konfiguracije TRM-a na pločama, gredama i stupovima

Element koji se pojačava i konfiguracija pojačanja	
<p>Ploče na savijanje</p> 	<p>Grede na savijanje</p> 
<p>Grede na poprečnu silu</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 40px; margin-right: 10px;"></div> <div style="margin-right: 10px;">SB</div>  </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 40px; margin-right: 10px;"></div> <div style="margin-right: 10px;">UW</div>  </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 40px; margin-right: 10px;"></div> <div style="margin-right: 10px;">FW</div>  </div>	<p>Pojačanja stupova</p> 

S povećanjem broja slojeva, nosivost i deformabilnost se neproporcionalno povećava, a povećanje je značajnije kod promjene broja slojeva s jednog na dva, nego pri većem broju slojeva. Broj slojeva utječe i na promjenu načina otkazivanja, zbog bolje impregnacije morta, pa tako uzorci pojačani s jednim slojem često otkazuju klizanjem tkanine u matrici, što se s povećanjem broja slojeva mijenja u odvajanje matrice od podloge. Povećanje broja slojeva također štiti od preranog sloma tkanine [9, 15]. Učinak većeg broja slojeva manje je izražen kod stupova većeg poprečnog presjeka. Oblik stupova koji se ovijaju ima utjecaj na učinkovitost pojačanja. TRM je najučinkovitiji kod kružnog presjeka zbog jednolikog tlaka, a kvadratni presjek je učinkovitiji od pravokutnog. Povećavanjem radijusa zaobljenja prizmatičnih uglova, povećava se deformabilnost [16]. Utjecaj tlačne čvrstoće betona na učinkovitost pojačanog elementa treba istražiti jer se u nekim ispitivanjima pokazala kao nebitan parametar, a u nekim je imala utjecaj. Čelična armatura, uzdužna i poprečna, ima utjecaj na pojačanja. Kao

što se i može očekivati, uzorci s većim omjerom unutarnje armature imaju manje povećanje konačne čvrstoće upravo zbog većeg doprinosa armature [17].

4 Zaključak

Dosadašnja ispitivanja pokazala su da tkaninom armirani mortovi imaju velik potencijal za pojačanja AB konstrukcija, i to ne samo za pojačanje nosivosti na savijanje, poprečnu i uzdužnu silu, nego i za povećanje duktilnosti, što je od velike važnosti u seizmički aktivnim područjima. Kako bi se materijal pravilno iskoristio, važno je osigurati dobru vezu podloge koja se pojačava i matrice, matrice i vlakana te samih vlakana. S obzirom na složenost mehanizma prijenosa opterećenja, mnogo je parametara koji utječu na kompozitno djelovanje, a time i na učinkovitost pojačanja. Važan je izbor vlakana i matrice, gustoća mreže, odnosno količina vlakana, debljina morta, broj slojeva i konfiguracija pojačanja, mogućnosti i načini sidrenja, oblik i veličina presjeka te količina uzdužne armature. Potrebno je provesti dodatna ispitivanja kako bi se proučili i kvantificirali ovi parametri, a i provjerili još neki, poput čvrstoće betona i stupnja oštećenosti. Daljnja ispitivanja su potrebna kako bi se mogli uopćiti zaključci za određeni tip kompozita.

Literatura

- [1] 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, 10.1016/j.compstruct.2012.09.053
- [2] Awani, O., El-Maaddawy, T., Ismail, N.: Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures, *Constr. Build. Mater.*, 132 (2017), pp. 94-111, 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.125
- [3] Triantafyllou, T.: Strengthening of existing masonry structures: Concepts and structural behavior, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Elsevier, pp. 361-374, 2016.
- [4] ACI Committee 549.4R, *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)*, Farmington Hills, Michigan, 2013.
- [5] Awani, O., El Refai, A., El-Maaddawy, T.: Bond characteristics of carbon fabric reinforced cementitious matrix in double shear tests, *Construction and Building Materials*, 101 (2015), pp. 39-49, 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.017
- [6] Ombres, L.: Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete, *Composites: Part B*, 69 (2015), pp. 418-426, 10.1016/j.compositesb.2014.10.027

- [7] Koutas, L.N., Bournas, D.A.: Flexural Strengthening of Two-Way RC Slabs with Textile-Reinforced Mortar: Experimental Investigation and Design Equations, *Journal of Composites for Construction*, 21 (2017) 1, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000713
- [8] 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, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000218
- [9] Triantafillou, T.C., Papanicolaou, C.G.: Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets, *Materials and Structures*, 39 (2006) 1, pp. 93–103, 10.1617/s11527-005-9034-3
- [10] Al-Salloum, Y.A. et al.: Experimental and numerical study for the shear strengthening of reinforced concrete beams using textile-reinforced mortar, *Journal of Composites for Construction*, 16 (2012) 1, pp. 74–90, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000239
- [11] Triantafillou, T.C., Tzoura, E.: Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets, *Materials and Structures*, vol. 49 (2016) 1-2, pp. 17–28, 10.1617/s11527-014-0470-9
- [12] Ombres, L.: Concrete confinement with a cement based high strength composite material, *Composite Structures*, 109 (2014), pp. 294–304, 10.1016/j.compstruct.2013.10.037
- [13] Triantafillou, T.C., Papanicolaou, C.G.: Textile Reinforced Mortars (TRM) versus Fiber Reinforced Polymers (FRP) as Strengthening Materials of Concrete Structures, *Proceedings of the Seventh International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7)*, Kansas City, Missouri, 2005.
- [14] Bournas, D.A. et al.: Textile-reinforced mortar versus FRP jacketing in seismic retrofitting of RC columns with continuous or lap-spliced deformed bars, *Journal of Composites for Construction*, 13 (2009) 5, pp. 360–371, 10.1061/_ASCE_CC.1943-5614.0000028
- [15] Ombres, L.: Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material, *Composite Structures*, 94 (2011) 1, pp. 143-155, 10.1016/j.compstruct.2011.07.008
- [16] Colajanni, P. et al.: Effects of confinement level, cross-section shape and corner radius on the cyclic behavior of CFRCM confined concrete columns, *Constr. Build. Mater.*, 55 (2014), pp. 379–389, 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.035
- [17] Ebead, U. et al.: Effectiveness of fabric reinforced cementitious matrix in strengthening reinforced concrete beams, *Journal of Composites for Construction*, 2016, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000741

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.21>

Pregled modela vremenski ovisnog ponašanja betona

Ante Džolan

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet
kontakt: a.dzolan@yahoo.com

Sažetak

Beton kao građevni materijal, u današnjem obliku, počeo se koristiti krajem 19. stoljeća. Međutim, tlačna čvrstoća betona znatno je veća od vlačne, te se beton armira kako bi armatura preuzela naprezanja u vlačnoj zoni betona. U vlačnoj zoni armiranog betona dolazi do otvaranja pukotina u betonu kada su vlačna naprezanja dostigla vrijednost vlačne čvrstoće betona. Kako bi se izbjegla pojava pukotina ili ograničila njihova širina, osmišljeno je prednapinjanje betona. Prednapinjanjem se u beton unose tlačna naprezanja prije njegova opterećivanja, te se time omogućuje tlačna raspodjela naprezanja po visini opterećenog betonskog presjeka, čime se izbjegava pojava pukotina. Prvi pokušaji prednapinjanja su propadali zbog nepoznavanja fenomena puzanja i skupljanja betona. Naime, u betonu se uslijed puzanja i skupljanja pojavljuju naprezanja koja mogu dovesti do otvaranja pukotine prije opterećivanja betona. Puzanje i skupljanje predstavljaju vremenski ovisne deformacije, gdje puzanje, za razliku od skupljanja, ovisi i o opterećenju. Deformacije izazvane puzanjem i skupljanjem mogu biti i nekoliko puta veće od deformacija izazvanih djelovanjem kratkotrajnih statičkih opterećenja, tako da je besmisleno proučavati ponašanje konstrukcija zanemarujući efekte puzanja i skupljanja betona.

Glavne riječi: puzanje, skupljanje, prednapinjanje, beton

An overview of the models for time dependent behavior of concrete

Abstract

Using of the concrete as building material in its present form began at the end of the 19th century. However, the compressive strength of the concrete is considerably higher than the tensile strength and the concrete is reinforced that the reinforcement takes the stresses in the tensile zone of concrete. In the tensile zone of reinforced concrete, concrete cracking occurs when tensile stresses have reached the value of tensile strength of concrete. In order to avoid cracking or limiting their width, the idea of pre-stressing concrete appears. By prestressing, compressive pressures are applied to the concrete before loading the concrete, thereby it is provided compressive pressure distribution at the height of the loaded concrete section, avoiding the occurrence of cracks. The first attempts prestressing haven't been succeed because it was unknown phenomenon of creep and shrinkage concrete. Namely, there are stresses in concrete that are caused with creep and shrinkage and that can cause cracking of concrete before loading of concrete. Creep and shrinkage represent time-dependent deformations, where creep, unlike shrinkage, also depends of the load. Deformations caused by creep and shrinkage may also be several times greater than deformations caused by the action of short-term static loads, so it is meaningless to study the behavior of the structures by neglecting the effects of creep and shrinkage of concrete.

Keywords: creep, shrinkage, prestressing, concrete

1 Uvod

Beton je i danas najčešće upotrebljavani građevni materijal, iako se može reći da je razvoj betona kao materijala započeo još u antičko doba. Tada su se kao građevni materijali koristili cementi od drobljenog i spaljivanog gipsa ili vapnenca, a služili su za povezivanje kamena. Tisućljetnim poboljšavanjem takvih materijala, te njihovim miješanjem s drugim materijalima, kao konačni proizvod dobio se moderni beton. Ključni napredak u razvoju betona ostvaren je ugradnjom metala (obično čelika) u betonsku mješavinu, tj. korištenjem armiranog betona.

Beton pokazuje različito ponašanje u tlaku i vlaku, te se približno uzima da je tlačna čvrstoća betona desetak puta veća od vlačne. Prve pojave nelinearnosti u betonu opterećenom kratkotrajnim opterećenjima pojavljuju se pri naprezanjima koja iznose 50 do 70 % odgovarajuće vlačne ili tlačne čvrstoće betona, dok se pri dugotrajnim opterećenjima nelinearnost pojavljuje pri veličini vlačnih ili tlačnih naprezanja 30 % od odgovarajuće čvrstoće betona [1]. S daljnjim povećanjem opterećenja dolazi do pojave novih pukotina i širenja postojećih, odnosno do daljnjeg opadanja modula elastičnosti i povećanja anizotropnosti betona. Pukotine u vlačnom području betona su trajne, te je nužno ograničiti njihovu širinu kako bi se osigurala trajnost i uporabljivost konstrukcije.

Kako bi se ograničila širina pukotina, te time osigurala trajnost i uporabljivost konstrukcija, pristupa se prednapinjanju betonskih elemenata. Smisao prednapinjanja je da se u betonskom elementu umjetno izazovu tlačna naprezanja koja će umanjiti vlačna naprezanja izazvana vlastitom težinom elementa i vanjskim uporabnim opterećenjima, te na taj način izbjeći pojavu pukotine ili joj ograničiti širinu. Prvi pokušaji patentiranja prednapinjanja datiraju još iz 19. stoljeća, međutim svi ti pokušaji u početku su bili bezuspješni. Razlog tome leži u činjenici kako istraživači u tome vremenu nisu poznavali efekt puzanja i skupljanja betona. Naime, uslijed skupljanja i puzanja u betonu su se pojavljivale deformacije, prije opterećivanja konstrukcije, koje bi neutralizirale početnu silu prednapinjanja.

Pri promatranju većih i značajnijih konstrukcija besmisleno je promatrati ponašanje na kratkotrajna opterećenja, a da se pri tome zanemari dugotrajno ponašanje samih konstrukcija. Vremenski ovisno ponašanje betona predstavljaju deformacije puzanja i skupljanja, gdje je puzanje deformacija ovisna o vremenu i dugotrajnom opterećenju na konstrukciju koja je veća od elastične deformacije u betonu izloženom trajnom djelovanju [2, 3]. Puzanje dovodi do povećanja elastične deformacije u vremenu, dok bi u slučaju nepostojanja puzanja početna elastična deformacija puzanja s vremenom opadala kao funkcija skupljanja betona i relaksacije čelika [4]. Razvojem deformacije puzanja u armiranim i prednapetim betonskim konstrukcijama tijekom vremena može doći do velikih preraspodjela naprezanja u samoj konstrukciji, čijim bi se zanemarivanjem mogla značajno ugroziti nosivost i stabilnost promatranih konstrukcija.

Puzanje ima karakter viskoznih deformacija, te se pojavljuje u području i tlačnih i vlačnih naprezanja betona. Puzanje u vlaku je manje izraženo nego u tlaku zbog manje vlačne čvrstoće u odnosu na tlačnu. Međutim, puzanje u vlaku je zanimljivo u mnogim praktičnim slučajevima [5], npr. u procjeni mogućnosti otvaranja pukotina zbog naprezanja izazvanih skupljanjem i temperaturnim djelovanjima [6].

Skupljanje betona predstavlja ukupno vremenski ovisno smanjenje volumena izazvano promjenom vlažnosti betonske mješavine. Kod spriječenih deformacija betona skupljanje će dovesti do pojave dodatnih naprezanja u betonu, koja uglavnom preuzima armatura. Prema tome, armatura može utjecati na smanjenje deformacije skupljanja [7-12]. Skupljanje umanjuje razvoj kontinuiranog vremenski ovisnog pomaka [4], te time smanjuje efekt puzanja.

Opisivanje ponašanja puzanja i skupljanja je izrazito nezahvalan zadatak zbog velikog broja parametara koji utječu na njih. Na skupljanje betona utječu sljedeći parametri [13-21]:

- mehanički utjecaji od temperaturnih promjena
- termički utjecaji hidratacije cementa
- hidrološki utjecaji vezani za hidrataciju
- hidrološki utjecaji vezani za klimu
- čvrstoća betona
- konzistencija svježije mješavine
- tip i količina cementa
- w/c faktor
- odnos količine finog agregata prema ukupnoj količini agregata
- sadržaj zraka
- efektivna debljina elementa.

Puzanje ovisi o svojstvu i količini cementne paste te o svojstvu agregata unutar betonske mješavine. Veći volumen agregata u betonskoj mješavini, kao i krući agregat, dovodi do smanjenja deformacije puzanja. Na razvoj puzanja utječu i uvjeti okoline u kojoj je beton pripremljen, ugrađen i opterećen, kao i konstrukcijsko rješenje konstrukcije, te vrijeme opterećivanja konstrukcije i način njegovanja betona [18]. Dvije najčešće veličine kojima se opisuje puzanje su koeficijent puzanja i funkcija puzanja. Zbog složenosti ponašanja puzanja i skupljanja, uslijed velikog broja parametara koji utječu na njihov razvoj, ne postoji neki općeprihvaćeni model njihova ponašanja. Modeli ponašanja puzanja i skupljanja većinom su vezani uz nacionalne propise. Neki od modela korišteni u literaturi dani su u sljedećem poglavlju.

2 Pregledni prikaz modela vremenski ovisnog ponašanja betona

Osnovni reološki modeli su:

- model idealno elastičnog tijela ili Hookov model
- Newtonov model idealnog fluida
- model idealno plastičnog Saint Venantovog materijala [1].

Model idealno elastičnog tijela predstavljen je oprugom koja se pod djelovanjem stalne sile izdužuje ili skraćuje bez otpora trenja. Deformacija opruge jednaka je odnosu dužine izduživanja ili skraćivanja i početne dužine opruge, a proporcionalna je veličini naprezanja uslijed sile koja dovodi do istezanja ili skraćivanja opruge. Koeficijent proporcionalnosti je zapravo modul elastičnosti materijala od koga je izvedena opruga, te se međuovisnost naprezanja, deformacije i modula elastičnosti iskazuje Hookovim zakonom.

Newtonov model idealnog fluida najjednostavnije je prikazati kretanjem krutog klipa kroz viskoznu tekućinu pod djelovanjem vanjskih sila. Kod Newtonova modela vrijedi zakon proporcionalnosti između naprezanja i brzine deformacije.

Model idealno plastičnog Saint Venantova materijala može se opisati kretanjem teškog tereta po hrapavoj podlozi. Materijal se ponaša kao apsolutno krut i miruje sve do trenutka dostizanja nekog graničnog naprezanja, a potom se javlja nepovratna i neograničena deformacija.

Svi ostali modeli koji su predloženi u literaturi dobiveni su povezivanjem osnovnih modela u paralelu ili niz [1]. Tako se paralelnim povezivanjem modela idealno elastičnog tijela i Newtonova modela idealnog fluida dobije Kelvinov model, čiji je glavni nedostatak što ne može registrirati trenutnu elastičnu deformaciju te utjecaj starenja betona na konačnu veličinu viskozne deformacije.

Povezivanjem u niz modela idealno elastičnog tijela i Newtonova modela dobije se Maxwellov model koji zadržava svojstva fluida, odnosno s porastom vremena deformacija raste neograničeno, te pri rasterećenju ostaju deformacije postignute u procesu opterećivanja. Maxwellovim modelom ne može se opisati proces relaksacije betona.

Povezivanjem u niz modela idealno elastičnog tijela i Saint Venantova modela nastaje Prandtl-Reuseov model idealno elastoplastičnog tijela, koji do kritične veličine naprezanja daje elastično ponašanje materijala a po dostizanju kritičnog naprezanja simulira plastično ponašanje. Pri rasterećivanju dolazi do ukupnog povrata elastične deformacije dok plastična u potpunosti ostaje nepovratna.

Daljnijim povezivanjem u paralelu ili niz osnovnih reoloških modela i prethodno opisanih modela nastalih jednostavnijim njihovim povezivanjem dobiju se složeni reološki modeli. Složeniji reološki modeli bolje opisuju ponašanje materijala na dugotrajna opterećenja, ali istovremeno daju kompliciranije izraze kojima se opisuje to ponašanje.

Povezivanjem u paralelu "m" Maxwellovih modela dobiva se uopćeni Maxwellov model [22], koji može simulirati relaksacijsko ponašanje materijala.

Povezivanjem u niz Maxwellova i Kelvinova modela nastaje Burgerov model [22] koji može opisivati složenije ponašanje materijala nego Maxwellov i/ili Kelvinov model. Povezivanjem u niz visokoplastičnog modela (nastaje paralelnim povezivanjem Newtonova modela idealnog fluida i Saint Venantova modela) i modela idealno elastičnog tijela dobije se Binghamov model [22] koji ukupnu deformaciju materijala definira kao zbroj elastične, viskozne i plastične deformacije.

Povezivanjem u niz idealno elastičnog tijela s četiri Maxwellova modela povezana u paralelnu vezu dobije se višeslojni visokoelastični model [22], a on u sebi sadrži dio koji će posebno prikazati početnu elastičnu deformaciju i dio koji će prikazati vremenski ovisnu deformaciju puzanja betona.

Osim puzanja i skupljanja, na razvoj deformacija u armiranim i prednapetim betonskim konstrukcijama utječu tijekom vremena i pukotine u tim konstrukcijama, kao i temperaturne promjene kojima su konstrukcije izložene. U literaturi [23] opisan je model koji deformaciju računa kao zbroj deformacija od puzanja, skupljanja, temperaturnih utjecaja i pojave pukotina u promatranom elementu. Model se dobije povezivanjem paralelne veze tri Maxwellova modela i jednog modela idealno elastičnog tijela u niz s modelom ponašanja raspucalog betona i modela koji simulira pojavu skupljanja i temperaturne utjecaje. U literaturi [24] dan je preformulirani i poboljšani Bažantov B3 model. Dobiven je povezivanjem u niz modela idealno elastičnog tijela, "m" ojačanih Kelvinovih modela, tijela izloženog starenju s viskoznom ovisnošću o mikronapreznjima, elementa skupljanja i elementa temperaturnih utjecaja. Sljedeći model iz literature je fib Model Code 2010 [25, 26] koji predstavlja poboljšanje modela CEB/FIP Model Code-a 1990, odnosno CEB/FIP Model Code-a 1978. Tim modelom dana je nova poboljšana formulacija dugotrajnog vremenski ovisnog ponašanja betona. Puzanje se u tom modelu promatra kroz dvije komponente: osnovno puzanje i puzanje nastalo sušenjem. Sljedeću skupinu modela čine modeli vezani uz nacionalne propise, pa tako postoje: AASHTO LRFD 2010 [27] - model Američkog državnog ureda za autoceste i transport, ACI 209R-92 [3] - model američkog instituta za beton, AS 3600 [28] - model iz australskih propisa betonskih konstrukcija i model iz EC-2 [29] - model za proračun puzanja prema europskim normama. Glavne su razlike tih modela u broju parametara koji se uzimaju u obzir prilikom određivanja veličine koeficijenta puzanja. U posljednje vrijeme istraživanja u predloženom području vrlo su intenzivna. Tako se u literaturi [30] analizira vremenski ovisno ponašanje betona napravljenog od grubog agregata, dobivenog od recikliranog betonskog materijala, te je zaključeno kako se povećava efekt puzanja i skupljanja s povećanjem postotka recikliranoga grubog agregata u betonskoj mješavini. U literaturi [31] predstavljen je numerički model za proračun vremenski ovisnog ponašanja betona prednapetih aramidnim vlaknima koja su ojačana polimerom i/ili čeličnim užadima. Rad [32] bavi se istraživanjem vre-

menski ovisnog ponašanja betona načinjenog od polistirenskog agregata, dok se [33, 34] također bave problematikom puzanja i skupljanja kod betona ojačanih vlaknima ili umjetnim armiranim materijalima.

3 Zaključak

Iz svega opisanog može se zaključiti kako postoji veliki broj različitih modela za predviđanje vremenski ovisnog ponašanja betona. Međutim, različite teorije puzanja često daju različite rezultate, pa zbog toga Han sa suradnicima [35] predlaže stohastičko/probabilistički model određivanja dugotrajnih progiba koji se bazira na kratkotrajnim progibima. Danas se za proračun vremenski ovisnih deformacija betona najčešće koriste empirijski modeli, koji su uglavnom vezani za nacionalne propise. Međutim, modeli se uglavnom razlikuju brojem i vrstom parametara koje primjenjuju pri proračunu. Stoga je nužno razviti model vremenski ovisnih deformacija koji će uz primjenu što manjeg broja parametara davati pouzdane rezultate za veći broj različitih konstrukcijskih rješenja, te time predstavljati općeprihvaćeni model.

Literatura

- [1] Ivković, M.: Betonske konstrukcije II, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za materijale i konstrukcije, Beograd, 1981.
- [2] Naaman, A.E.: Prestressed Concrete Analysis and Design: Fundamentals, 2. izdanje, Techno Press 3000, 2004.
- [3] ACI Committee 209, Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep of Concrete (ACI 209.2R-08), Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2008.
- [4] Mante, D.M.: Improving Camber Predictions for Precast, Prestressed Concrete Bridge Girders, PhD Thesis, The Graduate Faculty of Auburn University, Auburn, Alabama, 2016.
- [5] Gilbert, R.I., Ranzi, G.: Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures, Spon Press, London and New York, 2011.
- [6] Aslani, F.: Experimental and Numerical Study of Time Dependet Behaviour of Reinforced Self-Compacting Concrete Slabs, PhD Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology Sydney, Sydney, 2014.
- [7] Ghali, A., Favre, R.: Concrete Structures: Stresses and Deformations, Chapman and Hall Ltd, New York, 1986.
- [8] Selna, L.G.: Time Dependent Behaviour of Reinforced Concrete Structures, UC-SESM Report No. 67-19, Division of Structural Engineering and Structural Mechanics, University of California, Berkeley, 1967.

- [9] Altoubat, S.A., Lange, D.A.: Early Age Shrinkage and Creep of Fiber Reinforced Concrete for Airfield Pavement, Aircraft Pavement Tehnology, 2001.
- [10] The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects, SP-194, ur. A. Al-Manaseer, ACI, 2000.
- [11] Chow, C.O., Hinton E., Abdel Rahman, H.H.: Analysis of Creep and Shrinkage Effect in Reinforced Concrete Beams, Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Split, 1984.
- [12] Ghali, A., Favre, R., Elbadry, M.: Concrete Structures: Stresses and Deformations, 3. izdanje, Spon Press, London, UK, 2002.
- [13] Šahinagić-Isović, M., Markovski, G., Čeček, M.: Shrinkage strain of concrete - causes and types, Građevinar, 64 (2012) 9, pp. 727-734
- [14] Bažant, Z.P.: Theory of creep and shrinkage in concrete structures: a precis of recent developments, Mechanics Today, Vol. 2, ur. Nemat-Nasser, S., Pergamon Press, New York, USA, 1975.
- [15] Bažant, Z.P.: Mathematical models for creep and shrinkage of concrete, Creep and Shrinkage in Concrete Structures, ur. Bažant, Z.P. i Wittmann, F.H., John Wiley and Sons, New York, USA, 1982.
- [16] Gilbert, R.I.: Time Effects in Concrete Structures, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands, 1988.
- [17] Van Zijl, G.P.A.G.: A Numerical Formulation for Masonry Creep, Shrinkage and Cracking, Series 11: Engineering Mechanisms 01, Delf University Press, 1999.
- [18] ACI Committee 209, Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete (ACI 209.1R), Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2005.
- [19] Neville, A.M.: Time-Dependent behaviour of Cemsave concrete, Concrete, 9 (No. 3), 36-39, 1975.
- [20] Lorman, W.R.: The theory of concrete creep, ASTM, Proc. 40, 1082-1102, 1940.
- [21] Polivka, M.P.: Studies of creep in mass concrete, Paper 12, Symposium on Mass Concrete, ACI Special Publication, No. 6, 30, 1964.
- [22] Pui Lam, N.G.: Constitutive Modelling and Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, PhD Thesis, The University of Hong Kong, Hong Kong, 2007.
- [23] Di Luizo, G.: Numerical model for Time-Dependent Fracturing of Concrete, Journal of Engineering Mechanics, 135 (2009) 7, pp. 632-640
- [24] Jirasek, M., Havlasek, P.: Microprestress-solidification theory of concrete creep: Reformulation and improvement, Journal Cement and Concrete Research, 60 (2014), pp. 51-62

- [25] Mola, F., Pellegrini, L.M.: The New Model for Creep of Concrete in FIP Model Code 2010, 37th Conferecne on Our World in Concrete and Structures, Singapore, 2012.
- [26] Holowaty, J.: New Formula for Creep of Concrete in fib Model Code 2010, American Journal of Materials Science and Application, 5 (2015) 3, pp. 59-69.
- [27] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6. izdanje, Washington, DC, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [28] AS 3600, Australian Standard™ Concrete Structures, Standards Australia International Ltd GPO Box 5420, Sydney, NSW, 2001.
- [29] EN 1992-1-1: Part 1-1: General rules and rules for buildings, Eurocode 2 – Design of concrete structures, European comitee for standardisation, Brusseles, 2004.
- [30] Seara-Paz, S., Gonzales-Fonteboa, B., Martinez-Abella, F., Gonzales-Taboada, I.: Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates - Creep and shrinkage, Construction and Building Materials, 122 (2016), pp. 95-109
- [31] Lou, T., Lopes, S.M.R., Lopes, A.V.: Time-dependent behavior of concrete beams prestressed with bonded AFRP tendons, Composites Part B: Engineering, 97 (2016), pp. 1-8
- [32] Tang, W.C., Cui, H.Z., Wu, M.: Creep and creep recovery properties of polystyrene aggregate concrete, Construction and Building Materials, 51 (2014), pp. 338-343
- [33] Zawam, M., Soudki, K., West, J.S.: Effect of Prestressing Level on the Time-Dependent Behavior of GFRP Prestressed Concrete Beams, Journal of Composites for Construction, 21 (2017) 4
- [34] Jeong, Y., Lee, J., Kim, W.S.: Modeling and Measurement of Sustained Loading and Temperature-Dependent Deformation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Bonded to Concrete, Materials, 8 (2015), pp. 435-450
- [35] Han, B., Xian, T.Y., Xie, U.B.: A Bayesian inference framework for predicting the long-term deflection of concrete structures caused by creep and shrinkage, Engineering Structures, 142 (2017), pp. 46-55.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.17>

Primjena pepela iz drvne biomase kao zamjena cementa u betonu

Ivana Carević, Nina Štirmer, Ivana Banjad Pečur

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale
kontakt: icarevic@grad.hr

Sažetak

Potreba za energetsom neovisnošću s jedne te pritisci na okoliš s druge strane doveli su do povećane potražnje i ulaganja u obnovljive izvore energije. Europska unija je postavila cilj da udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj energetskej potrošnji bude 20 % do 2020. godine (Direktiva o korištenju obnovljivih izvora energije 2009/28/EC), odnosno 27 % do 2030. godine (Okvir za klimatsku i energetskej politiku u razdoblju 2020. – 2030. godine). Povećanje korištenja biomase kao obnovljivog izvora energije dovelo je do porasta količine pepela čija cijena odlaganja sve više raste. Stoga je potrebno osigurati njegovo održivo i učinkovito gospodarenje. Jedna od mogućnosti održivog gospodarenja pepelom jest njegova primjena u građevinskej industriji. U radu je prikazana problematika gospodarenja pepelom iz drvne biomase (PDB), osvrt na karakterizaciju PDB-a, te preliminarni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje cementnih kompozita s različitim udjelima PDB-a kao zamjene za cement.

Ključne riječi: obnovljivi izvor energije, drvna biomasa, pepeo iz drvne biomase, betonska industrija

Use of wood biomass ash (WBA) as a cement replacement in concrete

Abstract

The energy independence need and the concern of our environment has led to an increasing demand investment in renewable energy and their sources. Under Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources, the European Union (EU) has set the goal to reach a 20 % renewable energy by the end of 2020. Moreover, within 2030 framework for climate and energy (COM/2014/015) agreed on EU's long-term commitment target of at least 27 % for the share of renewable energy consumed in the EU in 2030. Consequently with increasing of combustion of biomass in the energy production, the amount of ash derived from biomass combustion is also increasing. These significant quantities of ash requires its sustainable management. One of possible solution for its management is utilization of wood biomass ash (WBA) in the construction industry. This paper describes problems regarding WBA management, review of WBA properties and preliminary results of testing mechanical properties (compressive and flexural strength) of cement composites made with WBA in different amounts per cement mass.

Keywords: renewable energy sources, wood biomass, wood biomass ash, concrete industry

1 Uvod

Energane na krutu i plinovitu biomasu najznačajniji su obnovljivi izvor energije u Europskoj uniji te se očekuje da će biti jedan od glavnih aktera pri dostizanju europskog plana za primjenu 20 % obnovljive energije do 2020 [1]. Drvni otpad se smatra ugljično neutralnim gorivom, jer drvo apsorbira istu količinu ugljičnog dioksida dok raste koliko ga ispušta izgaranjem te ima prednost u odnosu na druge vrste biomase zbog manje proizvodnje otpadaka [2]. U 2010. godini je u Europskoj uniji na drvo i drvni otpad otpalo ukupno 49 % od ukupne potrošene energije proizvedene uz pomoć obnovljivih izvora u EU [3]. Republika Hrvatska ima velik potencijal biomase kao goriva: 48 % hrvatskog teritorija prekriveno je šumom [4]. Strategijom energetske razvoja Republike Hrvatske do 2020. godine [5] određene su hrvatske strateške odrednice usmjerene na povećanje udjela obnovljivih izvora energije u neposrednoj potrošnji, pri čemu se jedan dio odnosi na korištenje biomase u energetske svrhe, odnosno određeno je da će se do 2020. godine koristiti 85 MWe iz biomase. Trenutačno je u RH, prema Hrvatskom operateru tržišne energije d.o.o. (HROTE), koji vodi evidenciju obnovljivih izvora energije i organizira tržište električne energije u RH, u pogonu 25,955 MW instalirane snage elektrana na biomasu [6], a 95,342 MW instalirane snage elektrana na biomasu još nije pušteno u pogon, odnosno u pripremi su projekti za buduće izgradnje pogona elektrana na biomasu [7]. Premda toplinsko izgaranje smanjuje masu i volumen otpada [8], trend porasta primjene biomase kao obnovljivog izvora energije (OIE) utječe također na porast količine proizvedenog pepela koji se trenutačno odlaže na odlagališta otpada, na poljoprivredne površine ili u šumama, najčešće bez ikakva oblika kontrole. Nesustavno gospodarenje pepelom uzrokuje onečišćenje okoliša te potencijalnu opasnost za ljudsko zdravlje u nedostatku kontrole emisija onečišćenja [9]. Prema postojećim podacima [10], smatra se da je korištenjem šumske biomase 2005. godine u Europi proizvedeno $1,6 \times 10^7$ do 3×10^7 tona pepela, a prema Europskoj regulativi o povećanju 20 % obnovljivih izvora energije (OIE) do 2020. godine pretpostavlja se da će se količina pepela povećati do $15,5 \times 10^7$ tona [11]. U radu je prikazana problematika gospodarenja pepelom iz drvene biomase (PDB), tehnologija i procesi koji utječu na karakterizaciju i svojstva PDB-a, te potencijal primjene PDB-a u građevinskoj industriji, s posebnim osvrtom na primjenu u betonskoj industriji.

2 Gospodarenje pepelom iz drvene biomase

Gospodarenje PDB-om odnosi se na njegovo skladištenje, odlaganje te potencijalno moguće korištenje (ponovnu primjenu). Povećanjem količine pepela dolazi do smanjenja prostora za njegovo odlaganje, odnosno do povećanja rukovanja, prijevoza i samim time do povećanja troškova gospodarenja otpadom [12]. Troškovi upravljanja otpadnim pepelom iz biomase iznose između 200 i 500 eura po toni, a u budućnosti

se može očekivati povećanje troškova odlaganja u obliku poreza ili naknada na odlaganje, kao i poteškoće u pronalaženju novih odlagališta te strože EU direktive vezano uz odlaganje [13]. Zasad se 70 % pepela iz drvene biomase (PDB) odlaže, 20 % se nastoji primijeniti kao dodatak tlu u poljoprivredi i 10 % za ostale namjene [2, 14]. Odlaganje pepela iz drvene biomase bez ikakva oblika kontrole može prouzročiti onečišćenje zraka sitnim česticama nošenim vjetrom [15], onečišćenje podzemnih voda zbog izluživanja teških metala iz pepela, te ulazak teških metala u prehrambeni lanac [16]. Prilikom korištenja PDB-a u poljoprivredi, potrebno je otvoreno i javno pratiti njegov kemijski sastav, odnosno teške metale (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn) i potencijalno toksične esencijalne elemente (Zn i Cu) koji mogu imati značajan negativan utjecaj na tlo [17]. Dosadašnja znanstvena istraživanja pokazala su da se PDB može upotrijebiti i u građevinskoj industriji, tablica 1.

Tablica 1. Pregled potencijalne primjene pepela od biomase u građevinskoj industriji [18]

Red.br.	Primjena	Funkcija
1	Alternativna veziva kao zamjena za postojeći cement	komponenta
2	Proizvodnja klinkera (cementa)	sirovina
3	Betonski proizvodi niže kvalitete	(reaktivno) punilo
4	Građevni materijal za gradnju cesta	vezivo/sirovina
5	Opeke na bazi pijeska i vapna	punilo/vezivo
6	Infrastrukturni radovi (nasipi, nasipavanje)	materijal za nasipavanje
7	Stabilizator tla	vezivo
8	Umjetni agregat	sirovina

3 Sastav pepela iz drvene biomase

Karakteristike PDB-a ovise o:

- vrsti drva (biomase)
- tehnologiji spaljivanja, poglavito o temperaturi obrade PDB-a
- lokaciji u postrojenju na kojoj se sakuplja pepeo [4, 19].

Od tehnologija koje su na raspolaganju za proizvodnju električne i toplinske energije, kod spaljivanja drvene biomase uglavnom se primjenjuje tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju te izgaranje na rešetki [4]. S obzirom na mjesto skupljanja, PDB se može podijeliti na dvije kategorije:

- pepeo iz ložišta (eng. *bottom ash*) koji se skuplja pod rešetkom komore za izgaranje;
- leteći pepeo (eng. *fly ash*) koji nastaje čišćenjem dimnjaka te se dodatno može podijeliti u ciklonski pepeo (relativno gruba frakcija letećeg pepela skupljena od ciklona ili kotlova) i fine čestice iz elektrostatičkih i vrećica filtra [19].

Procjenjuje se da je prema do sada instaliranim kapacitetima u RH udio pepela iz ložišta oko 80 do 90 % od ukupnog volumena PDB-a. Tehnički propisi i norme (npr. HRN EN 450-1 [20]) daju niz zahtjeva za leteći pepeo koji se dobiva suspaljivanjem ugljena i 50 % "čiste" drvene biomase. Međutim norma ne daje uvjete primjene "čiste" drvene biomase. Stoga su nužna daljnja istraživanja i mogućnost primjene pepela iz drvene biomase u građevinskoj industriji koja bi rezultirala i smanjenim negativnim utjecajem građevinske industrije na okoliš. Fizička svojstva pepela uključuju distribuciju veličine čestica, oblik, gustoću pepela, potrebu (apsorciju) za vodom te utjecaj na reološko ponašanje, tj. obradljivost cementnih kompozita. Kemijska svojstva pepela uključuju reaktivnost (pucolanska i hidraulička), kemijski i mineraloški sastav, količinu neželjenih elemenata kao što su neizgoreni ugljik i kloridi. Ekološki utjecaj pepela odnosi se na količinu teških metala u kemijskom sastavu pepela te izluživanje [4].

4 Preliminarna ispitivanja primjene PDB-a u cementnim kompozitima

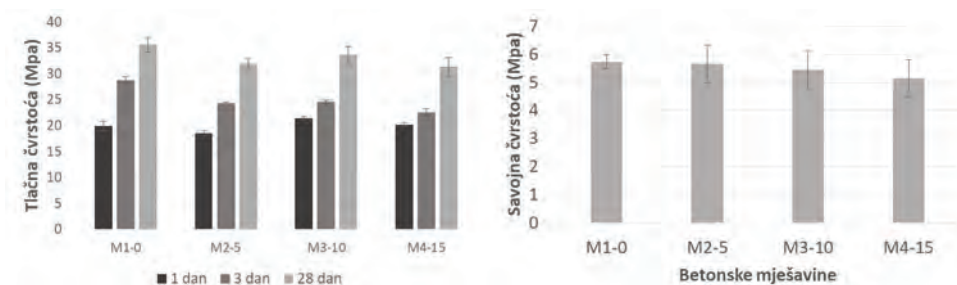
Radi boljšega razumijevanja primjene PDB-a u cementnim kompozitima, napravljena su preliminarna ispitivanja u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu gdje se u betonskim mješavinama dio cementa zamijenio PDB-om [21, 22]. U ispitivanju se koristio leteći PDB s elektrostatskog filtra koogeneracijskog postrojenja smještenog u Hrvatskoj koje koristi šumske ostatke iz drvene proizvodnje. U betonskim mješavinama dio je cementa zamijenjen različitim udjelima PDB-a, i to: 5 % kao M2-5, 10 % kao M3 -10 te 15 % na masu cementa kao M4-15. M1-0 predstavlja referentnu mješavinu, tablica 2.

Tablica 2. Sastav betonskih mješavina [22]

Materijal	M1-0	M2-5	M3-10	M4-15
Cement [kg]	350,0	332,5	315	295,5
PDB [kg]	0	17,5	35,0	52,5
Voda [kg]	175	175	175	175
Superplastifikator [%]	0,4	0,5	0,8	1,4
Aerant [%]	0,4	0,4	0,4	0,4
Agregat	1766,0	1753,6	1746,2	1739,3

Na slici 1. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 1, 3 i 28 dana, te čvrstoće na savijanje nakon 28 dana. Sve betonske mješavine imale su tlačnu čvrstoću veću od 30 MPa nakon 28 dana uz pad čvrstoće s povećanjem udjela PDB-a kao zamjene dijela cementa. Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana betonskih mješavina s povećanjem udjela PDB-a pada do 10 % (M4-15) u odnosu na referentnu mješavinu (M1-0). Tlačna čvrstoća je ispitana na uzorcima dimenzija 15 × 15 × 15 cm prema HRN

EN 12390-3:2009 [23], a čvrstoća na savijanje ispitana je na prizmama dimenzija 10 × 10 × 40 cm u skladu s normom HRN EN 12390-5:2009 [24].



Slika 1. Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje betonskih mješavina s dodatkom PDB-a kao zamjene za cement [21, 22]

5 Zaključak

Povećanjem upotrebe drvene biomase kao obnovljivog izvora energije, povećava se i količina PDB-a. Dosadašnjim pregledom stanja područja PDB-a iz elektrana na biomasu u Republici Hrvatskoj nije uočena njegova sustavna daljnja upotreba u drugim industrijskim granama, unatoč sve većim količinama PDB-a i njegovom nepovoljnom utjecaju na okoliš te potencijalu za ponovno korištenje [9]. Pregledom literature i objavljenih rezultata istraživanja, uočava se da postoje velike mogućnosti primjene PDB-a u građevinskoj industriji kao zanimljive alternative današnjim materijalima, a samim time i mogućnost uspješnog i održivog gospodarenja njime. S obzirom na niz varijabli koje utječu na sam kemijski i fizikalni sastav PDB-a (vrsta biomase, tehnologija postrojenja i mjesto skupljanja PDB-a), potrebna su dodatna istraživanja njegovih mogućnosti u građevinskoj industriji. Tijekom budućih istraživanja, koja će povezati građevinski i energetski sektor [25], uključit će se znanost o materijalima kao svojevrsna poveznica između dva sektora radi detaljne karakterizacije PDB-a, određivanje udjela sastojaka mješavine za građevinsku industriju te konačno utvrđivanje mogućnosti njegove primjene za potrebe betonske industrije. Multidisciplinarni pristup i sustavno istraživanje pokazat će da se dodana vrijednost otpada može znatno povećati u odnosu na današnje stanje. Primjenom PDB-a u betonskoj industriji zaokružiti će se cjelovito rješavanje problema otpada iz postrojenja na biomasu te će se uspostaviti primjer kontinuiranog lanca "od otpada do proizvoda". Posebno je važno imati na umu da prilikom upotrebe biomase kao goriva treba zadovoljiti kriterij održivosti: količina biomase koja se koristi mora biti jednaka količini biomase koja se obnavlja u prirodi.

Zahvala

Autori zahvaljuju na potpori istraživanju koje je financirala Hrvatska zaklada za znanost kroz istraživački projekt: **Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC²**, IP-06-2016.

Literatura

- [1] State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU, COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT-SWD, Brussels, 2014.
- [2] Chowdhury, S., Mishra, M., Suganya, O.: The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview, *Ain Shams Engineering Journal*, 6 (2015) 2, pp. 429–437
- [3] Eurostat (2012), Statistics in focus, renewable energy, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-SF-12-044/EN/KS-SF-12-044-EN.PDF
- [4] Ukrainczyk, N., Vrbos N., Koenders, E.A.B.: Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials, *Chem. Biochem. En Q.*, 30 (2016) 2, pp. 137–148.
- [5] Hrvatski sabor: Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2020. god., NN130/09
- [6] Hrvatski operator tržišne energije d.o.o. (HROTE): Povlaštene proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (stanje na dan 28.4.2017.)
- [7] Hrvatski operator tržišne energije d.o.o. (HROTE): Nositelji projekata s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija postrojenja još nisu puštena u pogon (stanje na dan: 28.4.2016.)
- [8] Cheah, C.B., Ramli, M.: Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement, *Construction Building Materials*, 30 (2012), pp. 320–329
- [9] Carević, I., Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B. et al.: Biomass ash potential and its status in Croatia, *Croatian Builders Convention 2016 - EU and Croatian Construction Engineering – Proceeding*, Lakušić, S. (ur.), Zagreb: Croatian Society of Civil Engineers, 2016, pp. 133-142, ISBN: 978-953-6686-18-6
- [10] James, A.K., Thring, R.W., Helle, S., Ghuman H.S.: Ash Management Review—Applications of Biomass Bottom Ash, *Energies* 2012, 5 (2012), pp. 3856-3873.
- [11] Obernberger, I., Supancic, K.: Possibilities of ash utilization from biomass combustion plants, *proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 29 June–3 July 2009

- [12] Raguzin, I.: Model analize troškova i dobiti uporabe biomase u proizvodnji, 2011.
- [13] Adrian, K., James, A.K; Thring, R.W., Helle S., Ghuman H.S.: Ash Management Review—Applications of Biomass Bottom Ash, *Energies* 2012, 5 (2012), pp. 3856-3873
- [14] Ban, C.C., Nordin, N.S.A., Ken, P.W., Ramli, M., Hoe, K.W: The high volume reuse of hybrid biomass ash as a primary binder in cementless mortar block, *American Journal of Applied Sciences*, 11 (2014) 8, pp. 1369-1378
- [15] Garcia, M.L., Sousa-Coutinhob, J.: Strength and durability of cement with forest waste bottom ash, *Construction and Building Materials*, 41 (2013), pp. 897–910
- [16] RECOAL: Reintegration of coal ash disposal sites and mitigation of pollution in the West Balkan Area, Handbook on treatment of coal ash disposal sites, INCO-WBC-1-509173, 2008.
- [17] James, A.K., Thring, R.W., Helle, S., Ghuman, H.S.: Ash Management Review—Applications of Biomass Bottom Ash, *Energies* 2012, 5 (2012), pp. 3856-3873
- [18] Eijk van, R.J.: Options for Increased Utilization of Ash from Biomass Combustion and co-firing, KEMA, 2012.
- [19] Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A. C. et al.: Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials, *J. Hazard. Mater.*, 172 (2009) 2–3, pp. 1049–1060
- [20] HRN EN 450-1:2013 Leteći pepeo za beton - 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti
- [21] Carević, I., Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B., Baričević, A.: Potential of use wood biomass ash (WBA) in the cement composities, *Proceedings of the 1st International Conference COMS_2017*, Banjad Pečur I. et al. (ur.), Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, pp. 109-114, 2017.
- [22] Carević, I., Štirmer, N., Banjad Pečur, I.: Utilization of wood biomass ash (WBA) in the in the cement composities, *Proceedings of the Second International RILEM Conference on Bio-based Building Materials*, ur. Amziane S., Sonebi M., e-ISBN: 978-2-35158-192-6, pp. 196 – 201, 2017.
- [23] HRN EN 12390-3:2009: Testing hardened concrete -- Part 3: Compressive strength of test specimens
- [24] HRN EN 12390-5:2009: Testing hardened concrete -- Part 5: Flexural strength of test specimens
- [25] Hrvatska zaklada za znanost: Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC2, IP-06-2016, Štirmer N., voditeljica projekta



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Betonske i zidane konstrukcije

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.34>

Effect of reinforcement on the fibre orientation within fibre reinforced concrete

Marta Miletić¹, François Guillard², Benjy Marks²

¹ Auburn University, Department of Civil Engineering, USA

² The University of Sydney, DynamiX Laboratory, School of Civil Engineering, Australia

kontakt: mmiletic@auburn.edu

Abstract

Ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC) is an advanced cementitious composite, which is characterized by its high compressive strength and enhanced durability. The mechanical and durability properties of UHPC are to a great extent dependent on fibre orientation within the cementitious matrix. However, determination of the actual three-dimensional fibre orientation has always been challenging, which limits the use of UHPC in the construction industry. In this paper, dynamic X-ray radiography, a nondestructive and noninvasive testing technique, is used to determine the fibre orientation via a new statistically-based method. Furthermore, the effect of unidirectional conventional reinforcement on fibre orientation in the UHPC structural member is examined. It was found that the presence of both mould edges and conventional reinforcement substantially affected fibre orientation. Because fibre orientation affects the post-cracking tensile strength, which is one of the main design parameters of UHPC, the effect of reinforcement and mould layout should be taken into account during the design of UHPC structural elements.

Keywords: UHPC, fibre orientation, dynamic X-ray radiography

Učinak armature na orijentaciju vlakana unutar betona armiranog vlaknima

Sažetak

Beton ojačan vlaknima posebno visokih svojstava (UHPC) je napredni cementni kompozit koji je karakteriziran visokom tlačnom čvrstoćom i povećanom trajnošću. Mehanička i svojstva trajnosti UHPC uglavnom ovise o orijentaciji vlakana unutar cementne matrice. Međutim, određivanje stvarne prostorne orijentacije vlakana uvijek je bio izazov, što ograničava upotrebu UHPC-a u građevinskoj industriji. U ovom radu za određivanje orijentacije vlakana korištena je dinamička rendgenska radiografija kao nedestruktivna i neinvazivna metoda ispitivanja uz pomoć nove metode uz pomoć statistike. Nadalje, istražen je učinak jednosmjerne konvencionalne armature na orijentaciju vlakana u UHPC konstrukcijskim elementima. Utvrđeno je da prisutnost oba ruba kalupa i konvencionalne armature značajno utječe na orijentaciju vlakana. Iz razloga što orijentacija vlakana utječe na vlačnu čvrstoću u raspucalom stanju, što je jedan od glavnih parametara kod projektiranja UHPC, učinak armature i oblika kalupa mora se uzeti u obzir tijekom projektiranja konstrukcijskih elemenata izvedenih UHPC-om.

Ključne riječi: beton armiran vlaknima, orijentacija vlakana, dinamička rendgenska radiografija

1 Introduction

Ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC) is a class of advanced cementitious composites, which is characterized by its high compressive strength and enhanced durability. Moreover, it contains a high cement and silica fume content, high dosage of a third-generation polymer based superplasticizer, very low water-to-binder ratio, and small but hard aggregates. Incorporation of short high-strength steel fibres to a cementitious matrix enables UHPC to exhibit a strain hardening (ductile) behaviour accompanied with multiple cracking under tensile loading [1].

The mechanical and durability properties of UHPC are to a great extent dependent on fibre orientation within the cementitious matrix [2]. For example, if the fibres are randomly distributed in all directions, the mechanical properties are expected to be isotropic and uniform in each direction; but if the fibres are even slightly aligned in one direction, the mechanical properties can vary significantly along different axes of a structural member. The uneven orientation and dispersion of fibres inside a structural element represent a crucial issue in the reliability of structures made of UHPC. In other words, it poses an element of risk that many engineers are unwilling to take, and hence distance them from incorporating UHPC into structural design.

It has been found experimentally and numerically by numerous research studies that the fibre orientation depends heavily on several factors such as the structural element's geometry [3], flowability of concrete [4], casting method [5], etc. On the other hand, research on the effect of conventional reinforcement on fibre orientation has been quite limited [6, 7]. The effect of the reinforcement on the fibre orientation within the structural member is an important factor because, although the fibres in UHPC structural members can carry all secondary (i.e., shear, temperature, shrinkage) tensile forces, and reduce and/or replace any mild steel reinforcement, UHPC alone is not strong enough, or is not an optimal economical solution, and the primary reinforcement is still needed.

Therefore, the main aim of this study is to provide quantified descriptions of the fibre orientation during casting of a structural member with and without reinforcement, using dynamic X-ray radiography.

2 Methodology

2.1 Experimental work

In order to more accurately predict fibre orientation within the matrix, UHPC has been replaced by a viscous grain-laden fluid, consisting of glass beads, glycerol, and steel fibres. Steel fibres used in this study were short straight wires and had a length of 11 - 14 mm and a diameter of 1 mm. The total volumetric fibre content adopted

in this experimental study was 2 % (by volume). Glass beads were used as the fine aggregate and had a particle size of 0.8-1 mm.

For this study, rectangularly shaped polycarbonate moulds were used, whose final dimensions are $H = 300$ mm, $W = 130$ mm and $L = 150$ mm (Figure 1). One mould was not reinforced by any rebar and one mould was reinforced with two bars 20 mm in diameter. The reinforcement details are depicted in Figure 1.



Figure 1. Schematic diagram of the experimental setup (all dimensions are in mm)

2.2 Dynamic X-ray analysis

The X-ray source and detector setup produced radiographs at 10 frames per second, with a resolution of 1920 x 1536 pixels. These radiographs captured the time evolution of the X-ray attenuation field, which is closely related to the density field, see Figure 2 for an example. Good contrast between the steel fibres, glycerol, and glass beads was achieved at an X-ray energy of 200 kV and 7.1 mA.

To recover incremental displacement fields between successive frames, particle image velocimetry was applied directly to the radiographs [8]. This technique recovers the median velocity along each ray path. Additionally, by using a Fast Fourier Transformation (FFT)-based approach, statistical information related to the orientation of the steel fibres in the matrix, and the evolution of the fibre orientation over time, was recovered [8].

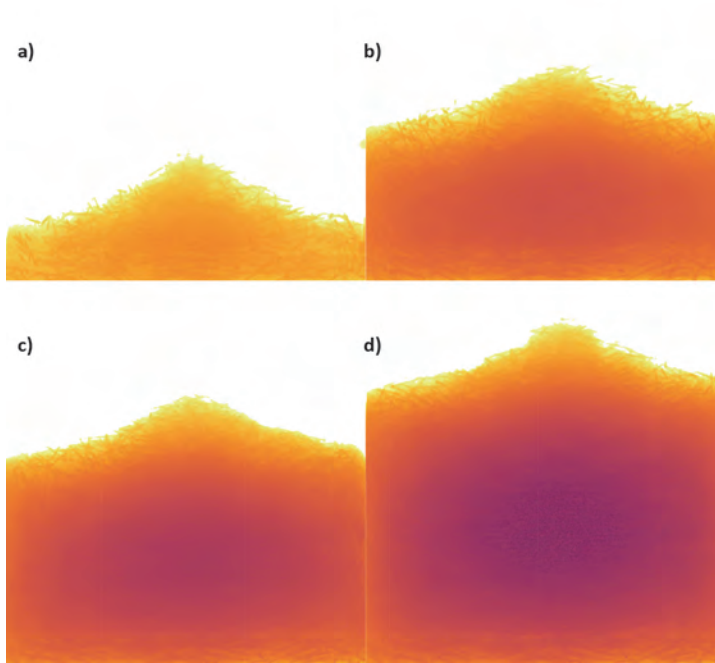


Figure 2. The time evolution of the X-ray attenuation field: a) after 2 minutes, b) 12 minutes, c) 22 minutes, and d) 32 minutes.

3 Results

The FFT-based approach allowed for the quantification of fibre orientation in structural elements both with and without reinforcing bars. Figure 3 shows a comparison of maps of the principal fibre orientation within the structural member with and without reinforcement. The height and width of the mould are denoted by H and W , respectively. The colour on the plots indicates the angle between the fibre major axis, and the horizontal plane in a counter-clockwise direction. It can be seen from Figure 3a that in the middle section of the structural member the majority of fibres tend to align in the horizontal plane, parallel to the bottom of the mould. Furthermore, because of the boundary restricting free orientation of fibres, fibres are aligned 45° and 135° counter-clockwise from the right and left vertical mould edges, respectively.

The effect of the reinforcement bar on fibre orientation is evident from Figure 3a. The fibres are no longer oriented horizontally but vertically in the middle section due to the vicinity of the reinforcement. The presence of the reinforcement also affected fibre orientation close to the mould edges. Fibres below the reinforcement make the 45° and 135° angles counter-clockwise from the right and left vertical mould edges, respectively, while their orientation is changed by approximately 90° if the fibres are above the reinforcement.

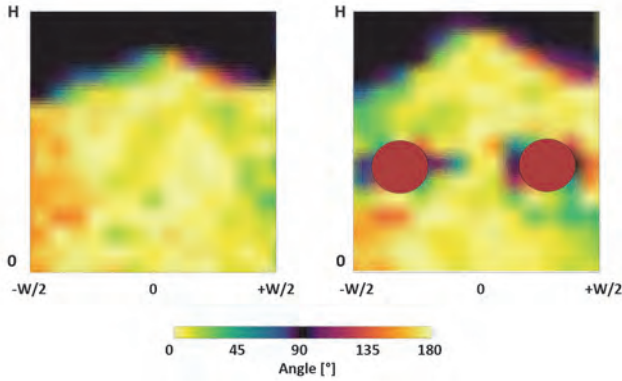


Figure 3. Principal fibre orientation within the structural member: a) without reinforcement, b) with reinforcement

In addition to quantifying fibre orientation, particle image velocimetry was used to measure flow velocity. Figure 4 compares velocity directions and magnitudes within the structural member both with and without reinforcement. The thickness of the lines is proportional to velocity. Comparing the direction of the fibre alignment (Figure 3) and the velocity direction (Figure 4), it can be seen that the fibres tend to align parallel to the flow direction.

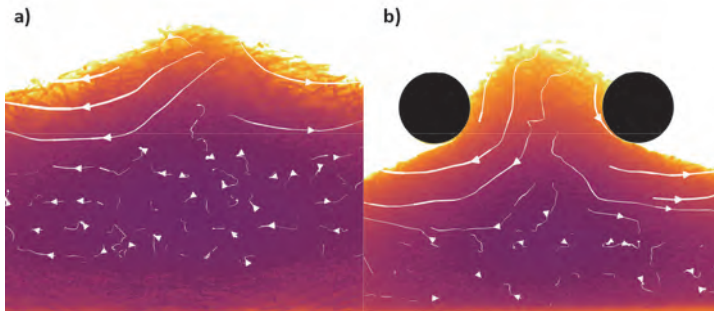


Figure 4. Velocity direction and magnitude within the structural member: a) without reinforcement, b) with reinforcement

4 Conclusions

Structural members without conventional reinforcement and members with unidirectional reinforcing bars were cast out of fibre reinforced composite. The effect of reinforcement on fibre orientation was measured using dynamic X-ray radiography.

It was found that fibre orientation is substantially affected by the presence of both mould edges and conventional reinforcement. Because the mechanical properties of fibre reinforced composites depend strongly on fibre orientation, the amount of reinforcement and the dimensions of the mould should be taken into account when designing fibre reinforced structural elements.

The results of this research program provide a stepping-stone towards the understanding of fibre orientation within structural members, which may, in turn, promote the further use of UHPC in structural design and construction industries.

References

- [1] Voo, Y., Foster, S. J.: *Reactive Powder Concrete: Analysis and Design of RPC Girders*, LAP Lambert Academic Publishing, 2010.
- [2] Maya-Duque, L., F., Graybeal, B.: IFibre orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC, *Materials and Structures*, 50 (2017), pp. 1-17.
- [3] Zhou, B., Uchida, Y.: Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fibre orientation and mechanical properties of UHPFRC, *Cement and Concrete Research*, 95 (2017), pp. 164-177, DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.017.
- [4] Boulekbatche, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., Amziane, S.: Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, *Construction and Building Material*, 24 (2010), pp. 1664-1671.
- [5] Ferrara, L., Ozyurt, N., Prisco, M., D.: High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of "casting-flow induced" fibre orientation, *Mater Struct*, 74 (2011), pp. 109-128.
- [6] Žirgulis, G., Švec, O., Geiker, M. R., Cwirzen, A., Kanstad, T.: Influence of reinforcing bar layout on fibre orientation and distribution in slabs cast from fibre-reinforced self-compacting concrete (FRSCC), *Structural Concrete*, 2 (2016), pp. 245-256, DOI: 10.1002/suco.201500064.
- [7] Thuc N. Nguyen, Tung T. Nguyen, Withit Pansuk: Experimental study of the punching shear behavior of high performance steel fibre reinforced concrete slabs considering casting directions, *Engineering Structures*, 131 (2017), pp. 564-573.
- [8] Guillard, F., Marks, B., Einav, I.: Dynamic X-ray radiography reveals particle size and shape orientation fields during granular flow, *Scientific Reports*, 2017, DOI: 10.1038/s41598-017-08573-y.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.11>

Ocjena rešetkastoga modela sa slobodnim odabirom nagiba tlačnih štapova primjenom modificirane teorije tlačnog polja

Hrvoje Vido

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
kontakt: hrvoje.vido@gradri.uniri.hr

Sažetak

U radu se prikazuje usporedba nosivosti grede na poprečne sile proračunane uporabom rešetkastoga modela sa slobodnim odabirom nagiba tlačnih štapova i modificirane teorije tlačnog polja. Statička neodređenost rešetkastoga modela, koji se temelji na Mörschovoj analogiji, prema normi HRN EN 1992-1-1 određuje se proizvoljnim odabirom nagiba u granicama [21,8°-45°]. Teorija tlačnoga polja, autora Mitchella i Collinsa, osim ravnotežnih jednadžbi uzima u obzir jednadžbe kompatibilnosti i nelinearnoga odnosa naprezanje-deformacija. Proračun je proveden na jednostavno oslonjenoj gredi T-presjeka s vitkim hrptom, opterećenom u sredini raspona. Usporedbe rezultata upućuju da granice odabira nagiba tlačnih štapova nisu dobro prilagođene.

Ključne riječi: *poprečna sila, dimenzioniranje, tlačno polje, nagib tlačnih štapova*

Evaluation of the truss model with free choice of strut angle by modified compression field theory

Abstract

This paper shows shear load capacity comparison between truss model with free choice of strut angle and modified compression field theory. Static indeterminacy of truss model, based on Mörsch analogy, according to standard HRN EN 1992-1-1 is determined by arbitrary angle choice in allowed limits [21.8°-45°]. Compression field theory of authors Mitchell and Collins, except equilibrium equations introduces compatibility equations and nonlinear stress-strain relation. Investigation is made on simple supported T-section beam with slender web, loaded in mid-span. Comparison of results imply that limits of strut angle choice are not well determined.

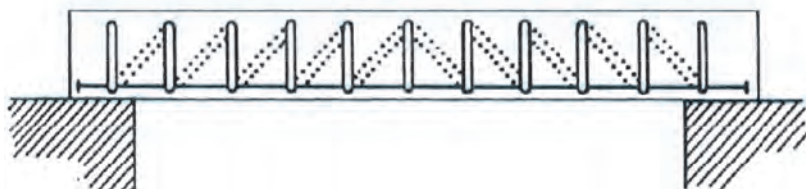
Keywords: *shear force, dimensioning, compression field, strut angle*

1 Uvod

Proračun armiranobetonskih elemenata na poprečne sile prema hrvatskoj normi HRN EN 1992-1-1 [1] temelji se na rešetkastom modelu s promjenjivim nagibom tlačnih štapova. Model se temelji na teoriji plastičnosti, prema kojoj uvjet ravnoteže može biti zadovoljen (uz odgovarajuću količinu uzdužne i poprečne armature) za bilo koji odabrani nagib tlačnih štapova, koji se prema [1] nalazi u ograničenom rasponu [21,8°-45°]. Za odabrani nagib tlačnih štapova, sustav je statički određena rešetka. Suvremena istraživanja [2] pokazuju da dimenzioniranje elemenata prema ovome modelu nije dovoljno točno, jer se pri odabiru donje granice nagiba tlačnih štapova precjenjuje nosivost. Osim odabirom nagiba tlačnih štapova, statička određenost može se postići primjenom uvjeta koji će dovesti do smanjenja nepoznanica u sustavu. Jedan od modela čini "teorija tlačnoga polja", u kojemu se rešetkasti model proširuje uvođenjem nelinearnoga odnosa naprezanje-deformacija i jednadžbi kompatibilnosti. Istraživanje se provodi usporedbom rezultata proračuna nosivosti određene prema dva navedena postupka.

2 Rešetkasti model s promjenjivim nagibom tlačnih štapova

Ritter (1899) i Mörsch (1908) došli su do zaključka da se, prema trajektorijama glavnih naprezanja, prijenos sila u armiranobetonskom elementu može opisati rešetkom. Ritterov model, prikazan na slici 1., koji je kasnije Mörsch teorijski objasnio, sastoji se od pojasnica rešetke, koje čine beton u tlaku i armatura u vlaku, dok se hrbat sastoji od betonskih dijagonalnih tlačnih štapova i poprečne armature u vlaku. Izvorna ideja da je nagib tlačnih štapova u hrptu 45°, slijedi iz otpornosti materijala za linearno elastičan element. Ova se ideja kasnije, zbog razlike u nosivosti, eksperimentalno pokazala pogrešnom [3].



Slika 1. Rešetkasti model prema Ritteru (1899) [2]

Daljnijim razmatranjem, Mörsch je zaključio da je nagib tlačnih štapova promjenljiv, no nije znao kako ga odrediti. Ova dodatna nepoznanica proširila je rešetkasti model na teoriju plastičnosti, prema kojoj je moguće dimenzionirati gredu na poprečne sile

za svaki, po volji odabrani, nagib tlačnih štapova. Dodatnu neodređenost čini međusobno prožimanje vlačnih i tlačnih polja, jer se spona nalaze na razmaku manjemu od horizontalne projekcije tlačnoga štapa [4]. Model je prihvaćen s praktičnim preporukama u odabiru nagiba tlačnih štapova [1-4]. Pojednostavljenje čini pretpostavka da se posmično naprezanje jednoliko raspoređuje u hrptu prema izrazu

$$v = \frac{V}{bz} [MPa] \quad (1)$$

gdje su v posmično naprezanje i V poprečna sila u promatranom poprečnom presjeku, b širina presjeka, a z krak unutarnjih sila u elementu.

Izrazi za nosivost modela izvedeni su iz uvjeta ravnoteže prema slici 2. uz pretpostavku vertikalne poprečne armature (spona) i proizvoljnoga nagiba tlačnih štapova Θ .

Horizontalna komponenta dijagonalne tlačne sile preuzima se u pojasnicama koje raspodjeljuju silu tako da polovina sile umanjuje tlak u tlačnoj pojasnici, dok druga polovina povećava vlak u vlačnoj pojasnici. Sila u horizontalnoj armaturi računa se prema izrazu (2), gdje je A_x površina i f_x naprezanje u armaturi:

$$\sum x = 0 \rightarrow A_x f_x = \frac{1}{2} v b z \cdot \text{ctg}(\Theta) \quad (2)$$

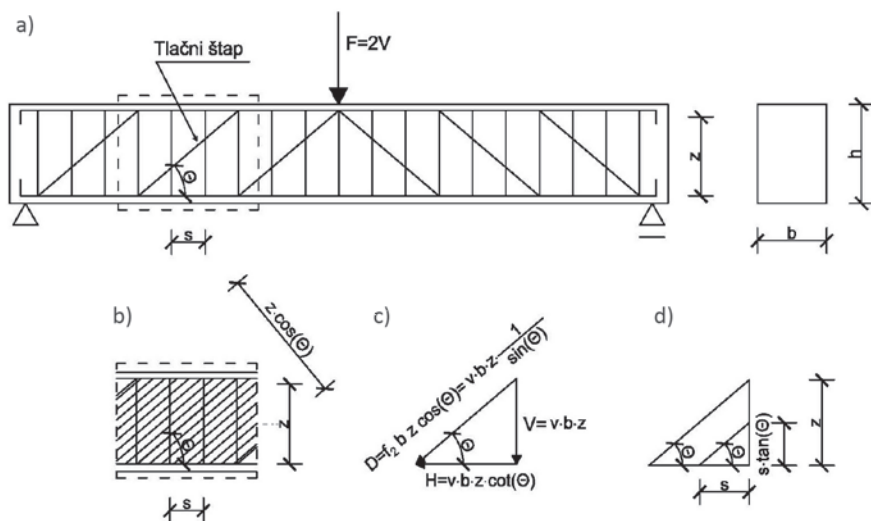
U praktičnoj primjeni ovo se povećanje vlaka preuzima produljenjem područja sidrenja.

Vertikalna komponenta sile preuzima se sponama koje su postavljene na razmaku, te se smatra da se sila jednoliko raspodjeljuje na svaku sponu unutar polja. Prema izrazu (3), sila je izražena preko površine A_v i naprezanja f_v u sponi:

$$\sum y = 0 \rightarrow A_v f_v = v b z \cdot \frac{s}{z} \text{tg}(\Theta) \quad (3)$$

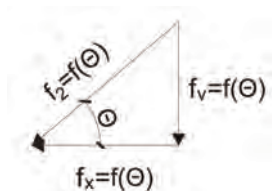
Dijagonalno tlačno naprezanje može se izraziti preko poprečne sile, u ovisnosti o nagibu, prema izrazu (4) koji slijedi iz ravnoteže sila u hrptu prema slici 2.c:

$$f_2 = \frac{v}{\sin(\Theta) \cos(\Theta)} = v(\text{tg}(\Theta) + \text{ctg}(\Theta)) \quad (4)$$



Slika 2. Rešetkasti model s promjenljivim nagibom tlačnih štapova: a) uzdužni i poprečni presjek elementa opterećenog poprečnom silom; b) tlačni ispunski štap u hrptu; c) ravnoteža sila u hrptu; d) preuzimanje vertikalne sile prema razmaku spona

Prema poligonu sila na slici 3. može se zaključiti da ravnotežu elementa čine 4 nepoznanice: dijagonalni tlak f_2 , naprezanje u poprečnoj armaturi f_v , naprezanje u uzdužnoj armaturi f_x , nagib tlačnih štapova Θ , sa samo 3 ravnotežne (prethodno izvedene) jednačbe.



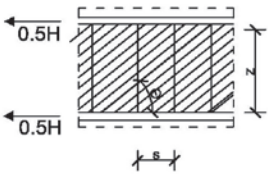
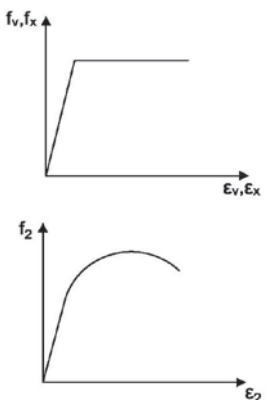
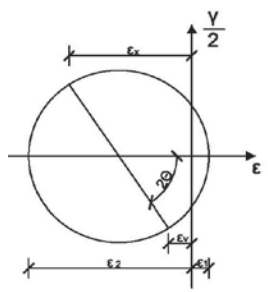
Slika 3. Poligon unutarnjih sila u hrptu elementa u funkciji nepoznanica naprezanja

Za odabrani se nagib tlačnih štapova dimenzioniranje provodi prema preporukama u literaturi [1-4], što čini sustav određenim. Primjenom izraza (2) i (3) može se uočiti da će za manji odabrani nagib biti više opterećena poprečna armatura, dok će za nagib 45° raspodjela unutarnjih sila zbog poprečne sile između uzdužne i poprečne armature biti jednaka. Tijekom proračuna također treba obratiti pozornost na nosivost tlačnih betonskih štapova, koja je jedan od razloga ograničenja donje granice nagiba.

3 Teorija tlačnoga polja

Mitchell i Collins [4] su proširili rešetkasti model primjenom uvjeta kompatibilnosti deformacija i nelinearnoga odnosa naprezanje-deformacija. Osnovna je zamisao promatranje stanja deformiranja za zadani sustav i određivanje ravnoteže preko ispunjavanja uvjeta navedenih u tablici 1. Pri tome je pretpostavka da se smjerovi glavnih naprezanja i deformacija poklapaju.

Tablica 1. Primjena nelinearne analize na rešetkasti model

RAVNOTEŽA	NAPREZANJE - DEFORMACIJA	KOMPATIBILNOST
 $f_2 = v(\tan(\Theta) + \cot(\Theta))$ $f_v = \frac{V}{A_v} \frac{s}{z} \tan(\Theta)$ $f_x = \frac{V}{A_x} \cot(\Theta)$		 $\tan^2(\Theta) = \frac{\epsilon_x - \epsilon_2}{\epsilon_v - \epsilon_2}$ $\epsilon_1 + \epsilon_2 = \epsilon_x + \epsilon_v$

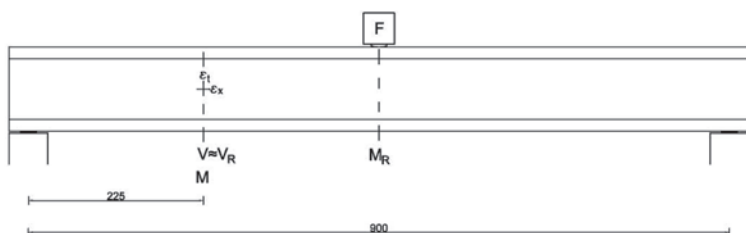
Teorija tlačnoga polja [4] sastoji se od tri uvjeta ravnoteže izvedena prema rešetkastom modelu, nelinearnoga odnosa naprezanje-deformacija za čelik i dijagonalno raspucani beton te uvjeta kompatibilnosti deformacija prikazanoga Mohrovom kružnicom deformacija. Unutarnje sile se određuju iz pretpostavki glavne vlačne deformacije unutar elementa na promatranom području te nagiba tlačnih štapova, čije stanje deformiranja slijedi iz uvjeta kompatibilnosti. Ispunjavanje uvjeta u tablici 1. svodi se na iteracijski proces u kojemu ravnoteža sila konvergira u ovisnosti o odabranoj (proizvoljnoj) glavnoj vlačnoj deformaciji. Pri tome vrijedi pretpostavka raspucanoga presjeka.

Ispitivanjem grednih elemenata utvrđena je veća nosivost od proračunske prema teoriji tlačnoga polja. Razlog je tome doprinos betona u vlaklu, koji je zanemaren u izvornoj ideji. Dopunom teorije tlačnoga polja doprinosom betona u vlaklu nastala je "modificirana teorija tlačnoga polja" [4], koja daje točnije rezultate procjene nosivosti na poprečnu silu. Proračun se može dopuniti uključivanjem dodatnih naprezanja i deformacija zbog utjecaja savijanja, kako bi teorija bila praktično primjenjiva.

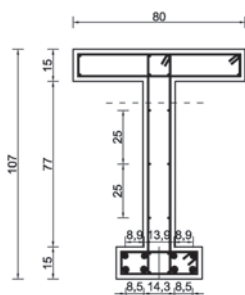
Analiza nosivosti elementa svodi se na algoritam u kojemu se za pretpostavljeno stanje deformiranja definira glavnom vlačnom deformacijom u hrptu $\varepsilon_1 > 0$ i nagibom Θ . Preko uvjeta ravnoteže, kompatibilnosti i odnosa naprezanje-deformacija iteracijskim se postupkom računa stanje naprezanja. Iz rezultata se može za traženo stanje naprezanja dobiti poprečna sila koja djeluje na promatranomu dijelu grede. Divergencija rezultata predstavlja nestabilan sustav do kojega dolazi zbog prekoračenja nekog od zadanih nelinearnih parametara.

4 Proračun armiranobetonskog elementa

Primjenom algoritma za proračun prema modificiranoj teoriji tlačnoga polja proračunan je jednostavno oslonjeni armiranobetonski element vitkoga hrpta, prikazan na slikama 4. i 5. Prethodno je provedeno dimenzioniranje na poprečnu silu prema rešetkastom modelu u skladu s HRN EN 1992-1-1 [1]. Upotrijebljeni materijali su beton razreda C30/37 i rebraste šipke B500B. Zadano proračunsko opterećenje iznosi $F = 1000$ kN. Kao rezultat dimenzioniranja, određena je poprečna armatura u obliku dvorezanih spona promjera 8 mm na razmacima $s = 20, 16$ i $9,5$ cm u ovisnosti o proračunskim nagibima tlačnih štapova $21,8^\circ, 26,5^\circ$ i 40° .



Slika 4. Jednostavno oslonjena greda opterećena u sredini raspona [5]



Slika 5. Poprečni presjek grede [5]

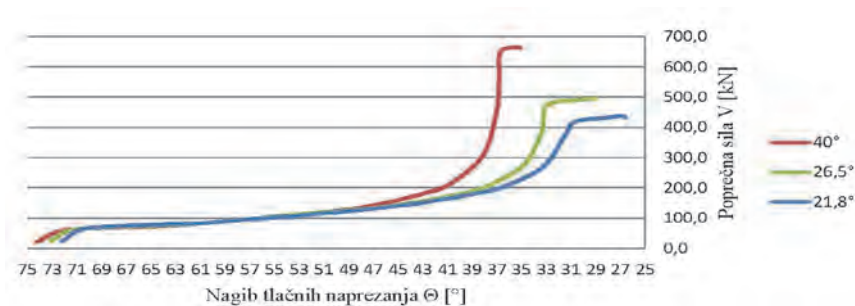
5 Analiza rezultata proračuna

Na slici 6. prikazan je odnos poprečne sile i kuta nagiba tlačnih štapova određen prema modificiranoj teoriji tlačnoga polja. Može se uočiti da tako određena nosivost na poprečne sile ovisi o odabranom proračunskom nagibu pri dimenzioniranju prema rešetkastom modelu. Greda je u sva tri promatrana slučaja dimenzionirana na proračunsku poprečnu silu 500 kN.

U slučaju dimenzioniranja za nagib tlačnih štapova $\Theta = 40^\circ$ greda ima najveću nosivost na poprečnu silu tj. $V_{Rd} = 661,8$ kN; što je veće od proračunske sile na koju je greda dimenzionirana. Nagib tlačnih štapova prema teoriji tlačnoga polja pri slomu iznosi $35,1^\circ$.

Kod odabranoga nagiba $\Theta = 26,5^\circ$ nosivost odgovara proračunskoj $V_{Rd} = 492,3$ kN \approx 500 kN. Do popuštanja armature dolazi pri ≈ 475 kN, i nagibu tlačnih štapova 33° .

Najmanji nagib $\Theta = 21,8^\circ$ ne zadovoljava proračunsku nosivost, $V_{Rd} = 432,9$ kN. Pri neznatno manjoj sili i nagibu 31° dolazi do granice popuštanja spona.



Slika 6. Odnos nagiba tlačnih štapova i nosivosti na poprečne sile [5]

6 Zaključak

Na temelju usporedbe rezultata proračuna grede na poprečne sile prema modificiranoj teoriji tlačnoga polja uočavaju se znatne razlike u odnosu na proračunsku nosivost grede prema rešetkastom modelu sa slobodnim odabirom nagiba tlačnih štapova. U prikazanom primjeru pokazano je da je, ako je poprečna armatura grede određena prema rešetkastom modelu za nagib kosih tlačnih štapova $21,8^\circ$, nosivost određena na temelju modificirane teorije tlačnog polja manja od one u polaznom rešetkastom modelu. U slučaju kad je za dimenzioniranje poprečne armature odabran kut 40° , nosivost određena prema modificiranoj teoriji tlačnoga polja znatno je veća od one koja se dobiva prema rešetkastom modelu. Za odabrani nagib tlačnih štapova u rešetkastom modelu $26,5^\circ$ nosivost određena na rešetkastom modelu i prema modificiranoj teoriji tlačnih štapova je podjednaka. Donju granicu nagiba tlačnih štapo-

va kod primjene rešetkastog modela sa slobodnim nagibom tlačnih štapova trebalo bi korigirati. U prikazanom primjeru donja granica je $26,5^\circ$. Odabirom velikoga kuta nagiba tlačnih štapova rešetkastog modela rješenje može biti suviše konzervativno, to jest neracionalno, kao što je pokazano u slučaju nagiba tlačnih 40° . Za preciznije definiranje granica nagiba tlačnih štapova, potrebno je provesti dodatna istraživanja koja bi uključila variranje količine poprečne i uzdužne armature, svojstva materijala, presjeka, statičkih sustava, opterećenja i drugo.

Literatura

- [1] EN 1992-1-1: Part 1-1: General rules and rules for buildings, Eurocode 2 – Design of concrete structures, European committee for standardisation, Bruxelles, 2004.
- [2] Grandić, D., Šćulac, P., Grandić, I.Š.: Nosivost armiranobetonskih greda na poprečne sile po kriteriju čvrstoće betonskih tlačnih štapova, Tehnički vjesnik, 22 (2015) 4, pp. 925-934
- [3] Tomičić, I.: Elementi naprezani poprečnom silom, Betonske konstrukcije, Školska knjiga, 1996.
- [4] Collins, M.P., Mitchell, D.: Members Subjected to Shear, Prestressed Concrete structures, Response publications, pp. 309-379, 1997.
- [5] Vido, H.: Ponašanje armiranobetonskih greda opterećenih poprečnim silama, Diplomski rad, Rijeka, 2014.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.27>

Numerička analiza betonske grede izložene udarnom opterećenju: utjecaj udarne površine

Natalija Bede

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
kontakt: natalija.bede@uniri.hr

Sažetak

Poznato je da ponašanje betonskih konstrukcija uvelike ovisi o brzini nanošenja opterećenja. Numeričke i eksperimentalne studije pokazuju da s porastom brzine opterećenja (brzine deformacije) dolazi do povećanja nosivosti, promjene oblika sloma, distribucije pukotine i brzine širenja pukotine. U radu je prikazan numerički model betonske grede sa zarezom izložene udarnom opterećenju pri različitim brzinama opterećenja. Glavni je cilj rada istražiti utjecaj udarne površine na slom betona, pojavu i razvoj pukotine. Stoga je provedena parametarska studija utjecaja veličine i oblika kontaktne površine udarnoga čekića na ponašanje betona zbog dinamičkog opterećenja. Provedena numerička analiza potvrdila je da veličina i oblik kontaktne površine udarnoga tijela pri većim brzinama opterećenja utječe na mehanizam sloma i smjer širenja pukotine (strukturnalni efekt).

***Ključne riječi:** slom betona, dinamičko opterećenje, brzina opterećenja, metoda konačnih elemenata, oblik sloma, račvanje pukotine*

Numerical analysis of the dynamically impacted concrete beam: influence of impact surface

Abstract

Behaviour of concrete structures is known to be strongly influenced by loading rate (strain rate). Numerical and experimental studies show that the increase in loading rate generates an increase in resistance, change of failure mode and crack pattern, and crack propagation velocity. A numerical model of the dynamically impacted notched concrete beam subjected to different loading rates is presented in this paper. The main objective of this study is to investigate influence of impact surface on concrete fracture, crack initiation and propagation. For that purpose, a parametric study is conducted to investigate the influence of the size and shape of the impactor contact surface on concrete behaviour when subjected to dynamic load. The numerical study has confirmed that the size and shape of the impactor contact surface affects the failure mechanism and crack propagation (structural effect) under higher dynamic loads.

***Keywords:** concrete fracture, dynamic load, rate sensitivity, finite element method, failure mode, crack branching*

1 Uvod

Betonske konstrukcije (npr. nuklearne elektrane, cestovni mostovi, platforme za bušenje nafte itd.) tijekom svoga vijeka trajanja često su izložene opterećenjima jakoga intenziteta i kratkog trajanja. Poznato je da se ponašanje betonske konstrukcije (nosivost, oblik sloma, način i brzina širenja pukotina) izložene dinamičkom opterećenju (udarno opterećenje) umnogome razlikuje od njezina ponašanja pri kvazistatičkom opterećenju. Osnovni je tome razlog to što pod dinamičkim opterećenjem odziv materijala (betona) postaje ovisan o brzini deformiranja (eng. *rate sensitivity*) te dolazi do pojave inercijalnih učinaka različitoga podrijetla, [1-3]. Numeričke i eksperimentalne studije pokazuju da s porastom brzine opterećenja dolazi do porasta nosivosti. Međutim, ovisno o brzini opterećenja dolazi i do promjene oblika (moda) sloma, načinu širenja pukotine te do pojave račvanja pukotine (eng. *crack branching*), [3, 4]. Opće je poznato da se s povećanjem brzine opterećenja način otvaranja pukotine mijenja od oblika I. (odvajanje u sredini zbog otvaranja pukotine od savijanja) do kombiniranoga sloma, oblik II. (odvajanje zbog kombinacije posmičnih i savojnih pukotina, odnosno kombinacije oblika I. i oblika II.). Na slici 1.a prikazan je tipičan primjer otkazivanja betonske konstrukcije zbog malih brzina opterećenje (oblik I.), a na slici 1.b zbog dinamičkoga opterećenja (kombinacija oblika I. i oblika II.). Do danas postoji ograničeni broj eksperimentalnih i numeričkih studija u kojima se istražuje oblika sloma u zavisnosti o brzini opterećenja. Štoviše, ponašanje betona zbog dinamičkoga opterećenja vrlo je teško razumjeti samo na temelju eksperimentalno dobivenih rezultata. Prema tome, numeričke su studije iznimno bitne, jer omogućavaju točniju interpretaciju eksperimentalnih rezultata. Međutim, numeričko modeliranje ponašanja betona zbog dinamičkoga opterećenja, posebice pojave fenomena račvanja pukotine ili promjene oblika sloma, još uvijek predstavlja veliki izazov za znanstvenike.

Na osnovi pregleda literature vidljivo je da su predložene razne eksperimentalne metode za ispitivanje ponašanja betonskih konstrukcija (uzoraka) pod dinamičkim opterećenjem. Za ispitivanja se najčešće rabi betonska greda izložena udarnom opterećenju čekića. Međutim, ne postoje normirana ispitivanja, već se testovi izvode s betonskim gredama različitih dimenzija i materijalnih svojstava te s različitim veličinama i oblicima udarnoga čekića. Građevinske su konstrukcije često izložene dinamičkim opterećenjima kod kojih je udarna površina velika u odnosu na konstrukciju. Prema tome, zanimljivo je istražiti ponašanje betonske konstrukcije (grede) uzimajući u obzir utjecaj veličine i oblika kontaktne površine udarnoga tijela (čekića).



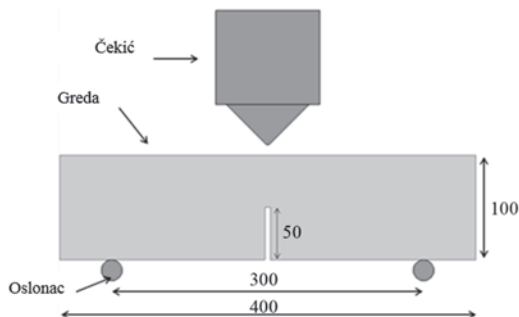
Slika 1. Mehanizam sloma a) savojni slom (statičko opterećenje), b) posmični slom (dinamičko opterećenje) [5]

2 Numerička analiza

Numerička je analiza betonske grede provedena primjenom programa s trodimenzionalnim konačnim elementima u koji je implementiran algoritam direktne numeričke integracije eksplicitnoga tipa te kontaktni algoritam [6]. Kao konstitucijski zakon ponašanja betona upotrijebljen je tzv. mikroravninski model betona. Primijenjeni konstitucijski zakon ovisi o brzini deformiranja [2, 3]. Više detalja o mikroravninskom modelu betona može se naći u [6, 7].

2.1 Validacija numeričkoga modela

Prije parametarske studije utjecaja geometrije kontaktne površine udarnoga čekića na oblik sloma i dinamičku nosivost betonske grede provjerena je valjanost modela usporedbom s eksperimentalnim rezultatima dostupnima u literaturi [1, 8]. Modeliran je eksperiment u kojemu su ispitane betonske grede sa zarezom izložene statičkom i dinamičkom opterećenju koje se postiže udarom čekića [8]. Geometrijske karakteristike betonske grede, preuzete iz [8], prikazane su na slici 2. Usporedbom dobivenih numeričkih rezultata s dostupnim eksperimentalnim rezultatima potvrđeno je da primijenjeni numerički model, utemeljen na mehanici kontinuuma, mikroravninskom modelu materijala i metodi konačnih elemenata, realistično opisuje ponašanje betona zbog dinamičkoga opterećenja, uključujući i složene pojave svojstvene velikim brzinama opterećenja, kao što su promjena nosivosti, promjena oblika sloma, pojava račvanja pukotine, propagacija pukotine i promjena brzine širenja pukotine. Više detalja može se naći u [4].



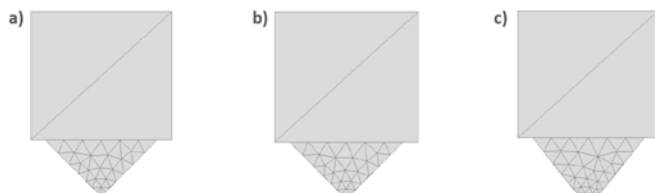
Slika 2. Geometrija (u mm) i način opterećenja betonske grede

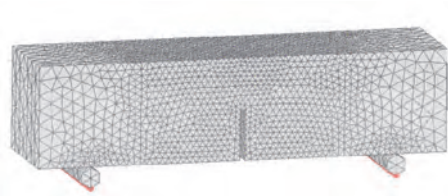
2.2 Numerički model betonske grede i udarnoga čekića

Kako bi se analizirao utjecaj oblika i veličine kontaktne površine udarnoga čekića na ponašanje betonske grede, numerička je analiza provedena za slučaja u kojem je udarna površina čekića u obliku a) polucilindra: linijski kontakt, b) pravokutnika: kontaktna površina 6×100 mm i c) pravokutnika: kontaktna površina 16×100 mm. Na slici 3. prikazane su geometrije i diskretizacije udarnoga čekića u sva tri slučaja. Osim oblika udarne površine čekića (vrh čekića), geometrijske su i materijalne karakteristike čekića iste u sva tri slučaja. Geometrija i diskretizacija numeričkoga modela betonske grede na osloncima za sva tri slučaja jednaka je, a prikazana je na slici 4. Upotrijebljeni su trodimenzionalni tetraedarski konačni elementi. Materijalne karakteristike betona (greda) i čelika (udarni čekić i cilindrični oslonci) upotrijebljene u numeričkoj analizi dane su u tablici 1.

Tablica 1. Mehaničke karakteristike materijala

	Beton [8]	Čelik
Youngov modul, E (GPa)	43,3	200
Poissonov koeficijent (pretpostavljena vrijednost), ν	0,18	0,33
Gustoća, ρ (kg/m^3)	2400	7800
Vlačna čvrstoća, f_t (MPa)	6,3	/
Tlačna čvrstoća, f_c (MPa)	127,0	/
Energija loma, G_f (N/m)	148	/

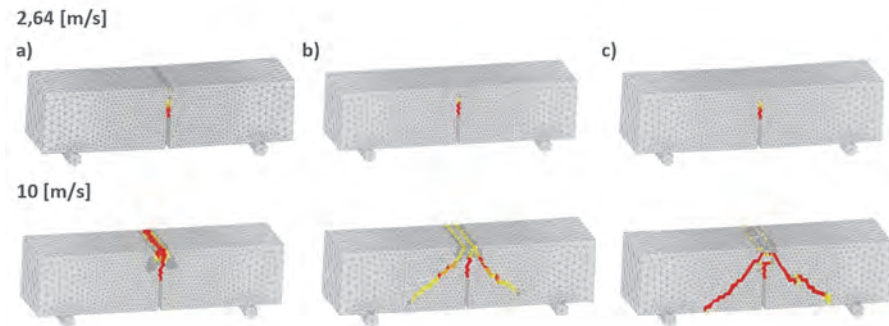

 Slika 3. Geometrija i diskretizacija čekića s udarnom površinom u obliku a) polucilindra: linijski kontakt, b) pravokutnika: kontaktna površina 6×100 mm, c) pravokutnika: kontaktna površina 16×100 mm



Slika 4. Diskretizacija betonske grede i čeličnih oslonaca

2.3 Utjecaj geometrije udarne površine na oblik sloma

Na slici 5. dan je prikaz mehanizma sloma betonske grede i smjer širenja pukotine za brzinu 2,64 m/s i 10 m/s u trenutku dostizanja maksimalne nosivosti. Očito, oblik sloma analizirane grede ovisi o geometriji udarne površine, ali i o brzini opterećenja. Za razmjerno male brzine opterećenja (reda veličine do 10^3 mm/s) u sva tri slučaja kontaktne površine javlja se jedna pukotina na sredini raspona grede (oblik sloma I.). Međutim, povećanjem brzine opterećenja na otprilike red veličine 10^4 mm/s dolazi do promjene oblika sloma te pojave fenomena račvanja pukotine. Dakle, s povećanjem brzine opterećenja dolazi do promjene načina otvaranja pukotine s oblika I. (pukotina od savijanja) na kombinaciju sloma oblika I. i oblika II. (kombinacija savojne i posmične pukotine).



Slika 5. Mehanizam sloma grede i način širenja pukotine pri opterećenju čekića s udarnom površinom u obliku a) polucilindra: linijski kontakt, b) pravokutnika: kontaktna površina 6×100 mm, c) pravokutnika: kontaktna površina 16×100 mm pri različitim brzinama udara u trenutku dostizanja maksimalne sile

3 Zaključak

Cilj je rada bio ispitati utjecaj geometrije udarne površine čekića na oblik sloma i oštećenja betonske grede pri različitim brzinama opterećenja, reda veličine 10^4 mm/s (kvazistatičko opterećenje) do 10^4 mm/s (dinamičko opterećenje). Na temelju numeričke analize može se zaključiti da oblik sloma za male brzine opterećenja, manje od

reda veličine otprilike 10^3 mm/s, nije osjetljiv na oblik kontaktne površine udarnog čekića. Naime, u sva tri slučaja udarne površine mehanizam je sloma betonske grede isti - oblik sloma I., npr. savojna se pukotina širi od dna zareza prema vrhu betonske grede, odnosno prema površini nanošenja opterećenja. Nakon povećanja brzine opterećenja mehanizam sloma i način širenja pukotina ovise o geometriji udarne površine čekića. Npr. pri brzini opterećenja reda veličine 10^4 mm/s u slučaju udarne površine oblika polucilindra (linijski kontakt) još je uvijek dominantan mehanizam sloma savijanjem. Međutim, povećanjem kontaktne površine dolazi do promjene oblika sloma (kombinacija sloma posmikom i savijanjem). Dakle, promjena mehanizma sloma betonske konstrukcije ovisi o energiji koja je apsorbirana zbog dinamičkoga udara; npr. za istu konstrukciju utjecaj će inercijalnih sila biti veći u slučaju veće kontaktne površine udarnoga tijela. Prema tome, realistično modeliranje kontakta između konstrukcije i tijela koje udara, oblika sloma, oštećenja i distribucije pukotina iznimno je bitno kako bi se mogao dobiti detaljan uvid u stvarno ponašanje betona zbog dinamičkoga opterećenja. Na temelju danih numeričkih modela moguće je istražiti utjecaj kontaktne površine na nosivost i otpornost betonskoga uzorka (konstrukcije).

Literatura

- [1] Bede, N., Ožbolt, J., Sharma, A., Irhan, B.: Dynamic fracture of notched plain concrete beams: 3D finite element study, *International Journal of Impact Engineering*, 77(2015), pp. 1776-188, 10.1016/j.ijimpeng.2014.11.02
- [2] Ožbolt, J., Bede, N., Sharma, A., Mayer, U.: Dynamic fracture of concrete L-specimen: Experimental and numerical study, *Engineering Fracture Mechanics*, 148 (2015), pp. 27-41, 10.1016/j.engfracmech.2015.09.002
- [3] Ožbolt, J., Bošnjak, J., Sola, E.: Dynamic fracture of concrete compact tension specimen: Experimental and numerical study, *Int J Solids Struct*, 50 (2013) 25-26, pp. 4270-4278, 10.1016/j.ijsolstr.2013.08.030
- [4] Bede, N.: Numerical and experimental study of concrete fracture under dynamic loading, Doktorski rad, Faculty of Civil Engineering, Rijeka, Croatia, 2015.
- [5] http://nees-anchor.ceas.uwm.edu/wenchuan_earthquake/eeri_lfe_wenchuan.html, pristupljeno 15.07.2017.
- [6] Irhan, B.: High velocity impact and fragmentation of concrete: Numerical simulation, Doktorski rad, Institute for Construction Materials, University of Stuttgart, Germany, 2014.
- [7] Ožbolt, J., Li, Y.J., Kožar, I.: Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint, *Int J Solids Struct*, 38 (2001), pp. 2683–2711.
- [8] Zhang, X.X., Ruiz, G., Yu, R.C., Tarifa, M.: Fracture behavior of high-strength concrete at a wide range of loading rates, *Int J Impact Engng*, 36 (2009), pp. 1204-1209.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.28>

Laboratorijska ispitivanja zidanih lučnih mostova, uključujući ispitivanje ponašanja veza

Mladen Kustura

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet
kontakt: mladen.kustura@gfmo.ba

Sažetak

Zidani lučni mostovi kao možda najljepši arhitektonski uradci čovjeka, ali i kao osnovni oblik povezivanja i spajanja ljudi i kultura razdvojenih riječnim preprekama, zaslužuju posebno mjesto i posebnu brigu kako bi i dalje služili svojoj namjeni. Sam način gradnje zidanih lučnih mostova zaslužuje posebnu pozornost i detaljno proučavanje, jer su iskustvo i znanje doveli do reprezentativnih objekata koji služe svojoj namjeni i plijene pozornost kroz stoljeća. Istraživanje ovakvih konstrukcija omogućit će realne spoznaje o načinu ponašanja i njihovu trajanju. Rad u sklopu doktorske disertacije ima za cilj utvrditi utjecaj različitih konstitutivnih materijala na kvalitetu ponašanja elemenata veza kamenoga ziđa kod lučnih mostova u seizmičkim uvjetima. Namjera je dobiti realnu sliku o učinkovitosti elemenata veze kamenoga ziđa u uvjetima intenzivne vibracije, kao i način loma s distribucijom oštećenja luka mosta. Laboratorijska ispitivanja trebala bi dati rezultate u obliku pomaka, ubrzanja, deformacije i svih drugih veličina od interesa za procjenu seizmičke stabilnosti lučnih mostova zidanih kamenim ziđem.

Ključne riječi: zidani lučni mostovi, statičko opterećenje, dinamičko opterećenje, veze kamenog ziđa

Laboratory tests of masonry arch bridges including tests of the connection behavior

Abstract

Masonry arch bridges as perhaps the most beautiful architectural works of man but also as the basic aspect of connecting and joining people and cultures separated by river barriers deserve special place and special care to continue serving their purpose. The very way of building masonry arch bridges deserves special attention and detailed study because experience and knowledge have led to representative buildings that serve their purpose and have been attracting attention throughout the centuries. Research regarding such constructions will provide realistic insight into the way of behavior and their duration. The aim of the doctoral dissertation is to determine the influence of different materials on the quality of the behavior of the elements of the stone wall that builds arch bridges in the seismic conditions. It is intended to obtain a realistic picture of the efficiency of the elements of the stone masonry in intense vibration conditions, as well as the way of breaking the distribution of bridge damage. Laboratory tests should give results in the form of shifts, accelerations, deformations and all other dimensions of interest to assess the seismic stability of arch bridges walled with stone.

Keywords: masonry arch bridges, static load, dynamic load, masonry arch bridges connection

1 Opis provedenih istraživanja

Provedena istraživanja mogu se podijeliti na dva dijela: eksperimentalna istraživanja u laboratoriju te istraživanja izradom numeričkih modela. Laboratorijska ispitivanja provedena su na Institutu za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju - IZIS, Univerziteta Sv. Ciril i Metodij u Skopju u Republici Makedoniji.

Eksperimentalna se istraživanja također dijele u dvije faze. U prvoj je fazi riječ o izradi šest segmenata luka u mjerilu 1:3 i njihovu ispitivanju pod prešom u laboratoriju. U drugoj je fazi izgrađen model Staroga mosta u omjeru 1:9 te je testiran na seizmičkoj platformi pri različitim razinama opterećenja.

2 Prva faza istraživanja

Karakteristični elementi veza upotrijebljeni pri sklapanju svoda Staroga mosta u Mostaru jedan su od uspješnih načina povećanja stabilnosti i nosivosti ove i sličnih građevina.

Osnovne su veze upotrijebljene pri sklapanju kamenih elemenata svoda mosta skobe (klanfe) i trnovi napravljeni od kovanoga željeza uz dodatnu uporabu lijevanog olova. Tehnika sklapanja uporabom navedenih spojnih sredstava dopustila je, uz uporabu morta, prilično učinkovit sustav povezivanja koji je primijenjen pri izgradnji Staroga mosta u Mostaru. Prilikom rekonstrukcije pronađeni su elementi za sklapanje prikazani na slici 1.



Slika 1. Trnovi i skobe pronađene prilikom rekonstrukcije Starog mosta

U prvoj je fazi laboratorijskih ispitivanja riječ o izradi šest segmenata luka u mjerilu 1:3 i njihovom ispitivanju pod prešom u laboratoriju.

Izrađeni segmenti luka vjerna su replika segmenata luka Staroga mosta. Materijal kamenih blokova i vezivno sredstvo tj. mort svojstava su približno istih kao materijali upotrijebljeni za gradnju Staroga mosta.



Slika 2. Modeli pripremljeni za ispitivanje

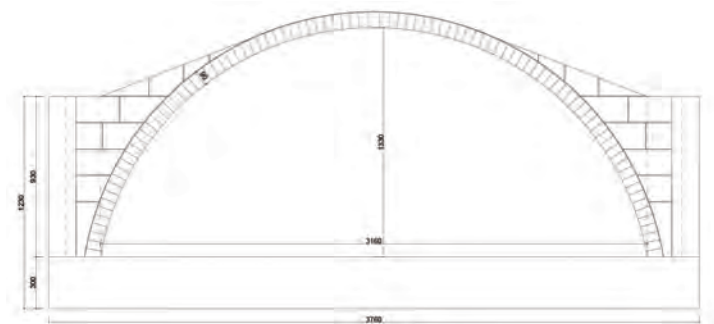
Skobe i trnovi rađeni su od kovanoga željeza, a za zalijevanje tih elemenata pri spajanju segmenata luka upotrijebljeno je lijevano olovo, sve po načelu gradnje luka Staroga mosta.

3 Druga faza istraživanja

U drugoj fazi izgrađen je model Staroga mosta u mjerilu 1:9, te je testiran na seizmičkoj platformi za različite razine opterećenja.

Izabrano mjerilo uvjetovana je dimenzijama platforme za seizmičko ispitivanje koja je veličine 4 x 4 m. U skladu se tim ukupna duljina ispitivanoga modela zajedno s temeljnom konstrukcijom iznosi 3,76 m. Geometrija prema kojoj je izgrađen model mosta prikazana je na slici 3.

Raspon modela mosta iznosi 3,16 m, a visina je luka od temelja do donje točke svoda 1,33 m.



Slika 3. Geometrija modela mosta

Materijali koji su upotrijebljeni za zidanje isti su kao i materijali upotrijebljeni za prvo eksperimentalno istraživanje, a načelo gradnje uključuje i vezivne elemente, skobe, trnove te lijevano olovo, kako bi model bio što vjerniji izvornoj konstrukciji.



Slika 4. Model mosta pripremljen za ispitivanje

Cilj je ispitivanja modela na platformi istraživanje seizmičkoga ponašanja sve do sloma modela, s praćenjem svih veličina odgovora konstrukcije – pomaka, ubrzanja, deformacija, koje su od značaja za procjenu seizmičke stabilnosti.

Ispitivanje je obavljeno u nekoliko faza:

- definiranje dinamičkih karakteristika modela
- ispitivanje u linearnom području s nizom seizmičkih testova
- ispitivanja do sloma, s povremenom provjerom dinamičkih karakteristika i opadanja krutosti modela.

Na osnovi rezultata eksperimentalnoga seizmičkog ponašanja modela mosta te nelinearnoga matematičkog modeliranja dobit će se realna slika ponašanja zidanih lučnih konstrukcija u seizmičkim uvjetima.

4 Zaključak

Za potrebe izrade doktorske disertacije provedena su prikazana laboratorijska ispitivanja. Rezultati provedenih ispitivanja još su uvijek u fazi obrade, te će biti prikazani u doktorskoj disertaciji.

Literatura

- [1] Glavni projekt rekonstrukcije Starog mosta u Mostaru, Mostar, 2000.
- [2] Kustura, M.: Magistarski rad: Ispitivanje seizmičke stabilnosti Starog mosta u Mostaru, Skopje, 2009.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Geotehnika

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.09>

Vukovarska gimnazija – istražni radovi i opažanja složenog geotehničkog problema

Jelena Kaluđer¹, Ivan Damjanović², Krunoslav Minažek¹

¹ Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, Osijek

² Državna geodetska uprava, Odjel za katastar nekretnina Vinkovci

kontakt: jkaluder@gfos.hr

Sažetak

Na zgradi vukovarske gimnazije, saniranoj od ratnih oštećenja tijekom Domovinskog rata, nedugo nakon početka uporabe počele su se primjećivati pukotine te uočavati znakovi slijeganja temelja. Zgrada koja je tlocrtno razvedena nalazi se na lesnom platou. U podnožju platoa postoje nepodgrađeni "podrumi" kojima su se svodovi počeli zarušavati, što se povezuje s provlaživanjem uslijed neadekvatne površinske odvodnje. Uz lesni plato dijelom su izvedeni stari obložni zidovi od opeke, a dijelom novi potporno-obložni zidovi, dio kojih ima značajke gravitacijskih zidova. Pri gradnji jedne dionice takvog potpornog zida blizu ruba gimnazijske zgrade došlo je do klizanja dijela pokosa u njegovoj pozadini, što je tada sanirano. Navedeni problemi, a posebice problem slijeganja, bili su povod za sanaciju temeljenja najviše oštećenog dijela zgrade, te je 2008. godine ona provedena izvedbom mlazno injektiranih pilota. Pri definiranju uzroka i opsega oštećenja građevine, ali i za ocjenu uspješnosti sanacije, više puta obavljani su geotehnički istražni radovi te mjerenja i opažanja na zgradi i okolišu, što je opisano u okviru ovoga rada.

Ključne riječi: *lesno tlo, slijeganje, istražni radovi u tlu, opažanja*

Vukovar High School Building – investigations and monitoring of a complex geotechnical problem

Abstract

The Vukovar High School building, repaired following war destructions during Homeland War, started to show cracks and signs of foundation settlement already after a short period of use. The building, widely spread and indented in plan, lies on a loess soil plateau. At the bottom of the plateau there are unlined "basements" whose vaults have started to collapse as a result of moisture due to inadequate surface drainage. Old brick lining walls and new lining and retaining walls, some having properties of gravity walls, actually border on the loess plateau. During construction of one part of such retaining walls, near the high school building, a part of slope was affected by sliding, which was subsequently remedied. All these problems, and the settlement problem in particular, have led to the remedy of foundations at the most damaged part of the building. Thus, in 2008, the remedial work was made by jet-grouted piles. Soil investigation works, measurements and monitoring activities were conducted on several occasions in order to find the causes and the extent of damage to the building, and also to confirm the success of repair activities, as described in the paper.

Keywords: *loess soil, settlement, soil investigations, monitoring*

1 Uvod, opis stanja i aktivnosti na građevini

Zgrada gimnazije u Vukovaru, sagrađena još 1894. godine, tijekom Domovinskog rada doživjela je iznimno stradanje – urušeno je krovništvo, međukatne konstrukcije te velik dio nosivih zidova, a okoliš je devastiran i zarastao u korov i šikaru (slika 1.). Poslije mirne reintegracije zgrada je obnovljena te 2000. godine puštena u rad [1].



Slika 1. Zgrada gimnazije u Vukovaru nakon ratnog razaranja na lesnom platou s “podrumima” u podnožju [2] (lijevo) i danas (desno)

Zgrada, koja je tlocrtno razvedena (slika 1. desno - pročelje, slika 2. – situacijski prikaz) nalazi se na lesnom platou u čijem podnožju se nalaze “podrumi” - nepodgrađeni tunnelski iskopi u lesu širine 2-4 m, duljine i do 20 m (slika 1., lijevo). Neki od tih podruma su zatrpani/zatvoreni pri izvedbi novog potporno-obložnog zida, ali je i mimo toga njihovu zarušavanju pridonijelo i provlaživanje lesnog tla zbog neadekvatne odvodnje platoa. Pri izvedbi jedne dionice potporno-obložnog zida u blizini školskog igrališta i blizu ruba jednog dijela zgrade došlo je do klizanja pokosa, što je sanirano tijekom gradnje novog potpornog zida.

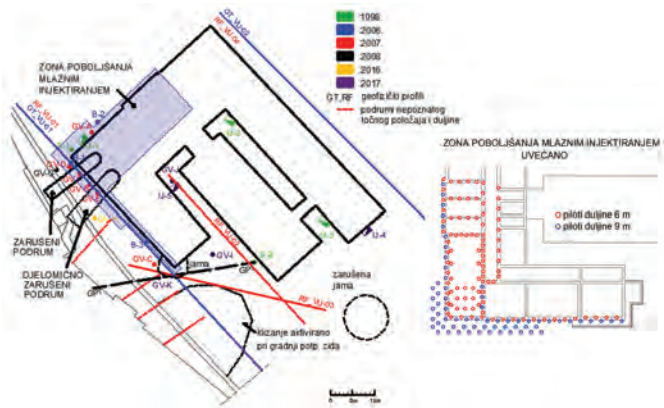
Nekoliko godina poslije obnove, na zgradi su se počele pojavljivati pukotine te su se mogli uočiti znakovi slijeganja pojedinih dijelova temelja. Navedeni problemi, a posebice problem slijeganja, zahtijevali su pažnju i praćenje te su 2006. provedeni istražni radovi u tlu i pri tomu instalirani sustavi geotehničkih i geodetskih opažanja [3, 4]. Pri osmišljavanju i provedbi istražnih radova u tlu kao i kod određivanja vrsta i pozicija elemenata sustava opažanja, u obzir su se morali uzeti uočeni odnosno mogući problemi: pojava pukotina na zidovima, slijeganje temelja, pojava klizišta i potencijalno klizanje uz građevinu, urušavanje svodova podruma u podnožju platoa na kojemu se zgrada nalazi, kao i pojava kaverne uz rub zgrade.

Poslije istražnih radova te opažanja i mjerenja, uzimajući u obzir navedene probleme, pristupilo se izradi projektnog rješenja sanacije temeljenja. Sanacija temeljenja obavljena je parcijalno ispod najviše oštećenog dijela zgrade 2008. godine izvedbom mlazno injektiranih pilota ispod temelja najugroženijih vanjskih i unutarnjih zidova [5]. Projektom je predviđeno dodatno slijeganje do 1 mm nakon izvedbe pilota. Uspješ-

nost sanacije kontrolirana je tijekom i nakon izvođenja radova opažanjem i mjerenjem – pokazalo se umjerenije širenje pukotina i slijeganja. Mjerenja i opažanja nastavila su se više godina nakon završetka sanacije. Uz sanaciju temeljenja, izveden je novi sustav oborinske odvodnje s krovnih ploha, no druge predviđene aktivnosti kao što je konstrukcijska sanacija raspucalih zidova, sanacija unutarnjeg kanalizacijskog sustava zgrade te izvedba adekvatne površinske odvodnje - nisu provedene. Uslijed izostanka tih aktivnosti predviđala se mogućnost pojave naknadnih negativnih posljedica. To se je ostvarilo i nakon 2011. godine kada zgrada doživljava pukotine u dijelu koji nije bio obuhvaćen mjerama sanacije, a dijelom u zoni u kojoj je izvedena sanacija temeljenja, no ne i konstrukcijska sanacija zidova [6]. Dodatno, 2014. godine u blizini spremnika za gorivo u dvorištu gimnazije, na mjestu prije postojećeg i saniranog klizanja, počela su se javljati slijeganja. To je izazvalo zabrinutost i potrebu da se cjelovito pristupi rješavanju problema. Tako je 2015. godine područje gimnazije uključeno u međunarodni projekt “RECALL -zajedno protiv lokalnih klizišta“. Projektom su predviđeni dodatni istražni radovi i nadopuna opažanja i mjerenja, a 2016. odnosno 2017. godine pristupa se istražnim radovima i izradi cjelovitog projektnog rješenja sanacije u svim potrebnim elementima.

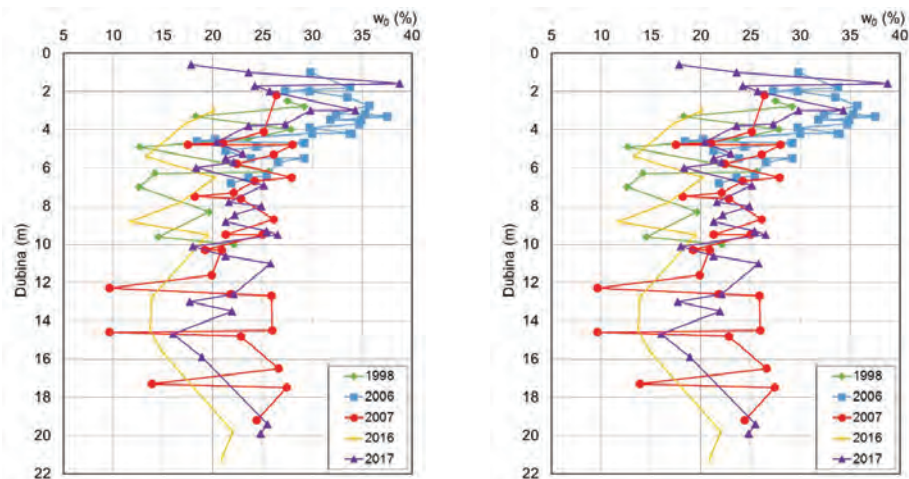
2 Istražni radovi u tlu

Istražni radovi u tlu obavljani su višekratno: za obnovu nakon rata prema geotehničkom elaboratu 1998. godine [7]; za projekt sanacije temeljenja 2006. godine [5]; te za potrebe cjelovite sanacije objekta 2017. godine [8]. U okviru istražnih radova u periodu 1998. - 2017. godine izvedeni su istražni raskopi i bušotine, in situ ispitivanja SPT te dilatometrom Marchetti, terenska identifikacija i klasifikacija te laboratorijska ispitivanja fizikalnih i mehaničkih svojstava tla. Osim istražnih bušenja i raskopa, u periodu 2014. - 2017. godine provedena su opsežna geofizička istraživanja tla: ispitivanja georadarom, seizmička refrakcijska istraživanja, geoelektrična tomografija kao i MASW seizmička ispitivanja. Oznake pozicija različitih istražnih radova po godinama prikazane su na slici 2. Pri provođenju istražnih radova neke od istražnih bušotina iskorištene su za instalaciju mjernih sustava za opažanja pomaka. Tijekom istražnih radova određena su prirodna vlažnost tla, granice tečenja i plastičnosti, konzistentno stanje, granulometrijski sastav, stišljivost u edometru, te parametri čvrstoće u jednoosnom, izravnom i troosnom CIU i CID pokusu.



Slika 2. Tlocrtni prikaz objekta s označenim pozicijama lokacija istražnih radova (geofizika, bušotine, opažanja) u periodu 1998.-2017. godine - lijevo, zona poboljšanja tla mlazno injektiranim pilotima - desno

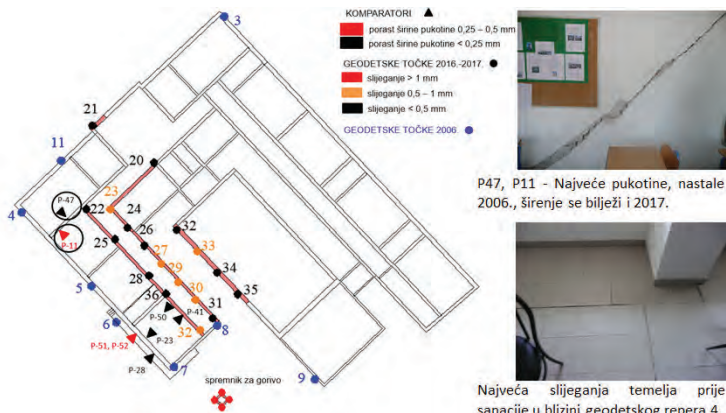
Prikaz promjene vlažnosti i indeksa konzistencije (utjecaj provlaživanja tla) tijekom vremena dan je na slici 3. Sva navedena ispitivanja poslužila su za izradu uzdužnih i poprečnih geotehničkih profila kao podloge za izradu kompleksnih 2D i 3D numeričkih modela kojima se analiziraju međusobni utjecaji zgrade gimnazije, potpornih zidova i tunela u podnožju lesnog platoa. Kalibraciji i povećanju pouzdanosti numeričkih modela pridonose i opažanja i mjerenja pomaka na građevini i okolišu.



Slika 3. Promjena vlažnosti i indeksa konzistencije u periodu 1998. - 2017. godine

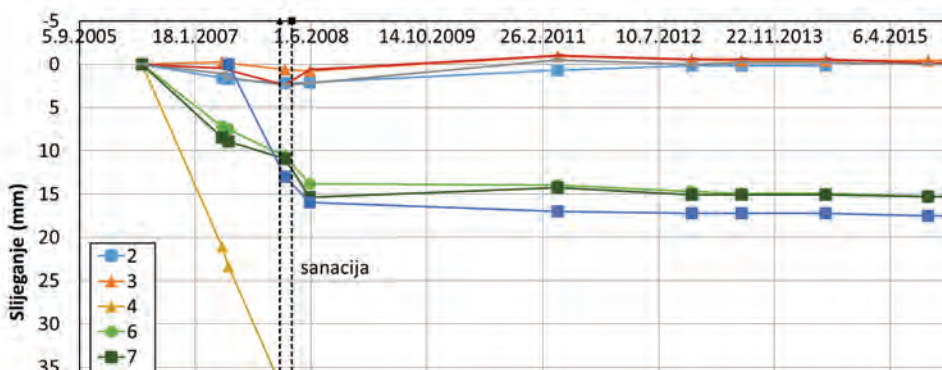
3 Opažanja i mjerenja

Sustavi opažanja i mjerenja prvi put su instalirani za vrijeme istražnih radova 2006. te su višestruko nadopunjavani, zaključno u 2016. godini. Opažanja i mjerenja poduzeta su u fazi istražnih radova radi utvrđivanja uzroka oštećenja zgrade i određivanja mjera sanacije, a s obzirom na uzroke oštećenja. Poslužila su pri određivanju načina i opsega sanacije te kako bi se utvrdila njena učinkovitost. S obzirom na složenost problema, opažanja i mjerenja pomažu u definiranju dominantnog uzroka: popuštanje tla i temelja zbog provlaživanja, popuštanja svodova “podruma” u podnožju ili je građevina zahvaćena ili ugrožena mogućim klizanjem prema pokosu. Iz navedenih razloga instalirano je više sustava mjerenja i opažanja. Na zidovima zgrade javljale su se pukotine čiji se intenzitet širenja prati mjerenjem pomoću mjernih stalca i prijenosnim komparatorom. Identificirane su pukotine koje su doživljavale najveće širenje, što je pridonijelo određivanju mehanizama i razmjera popuštanja. Na mjesto najizraženije pukotine ugrađen je automatski mjerač pukotina (eng. *crackmeter*) kojim se kontinuirano prati njena promjena širine. Položaj i izgled pukotine s najvećim širenjem prikazani su na slici 4. Od nastanka pukotine do završetka sanacije temeljenja 2008. godine širenje je iznosilo približno 20 mm, a povremeni periodi širenja i skupljanja bilježe se i nakon sanacije te je tijekom 2016. i 2017. godine širenje iznosilo do 0,5 mm. Ako bi se širenje značajnije nastavilo, mogla bi se dovesti u pitanje uporabivost građevine, što je predmet proračuna (izrada projekta sanacije konstrukcije je u tijeku). Određena dodatna pojava pukotina i slijeganja na dijelu zgrade gdje nije sanirano temeljenje pripisuje se izostanku potpune sanacije zgrade (konstrukcijska sanacija, površinska odvodnja, unutarnja kanalizacija), što se vidi na slici 4. gdje su označene zone promjene pukotina/slijeganja većih od 0,25-1,0 mm zabilježene tijekom 2016 i 2017. godine. Slijeganja zgrade i okoliša praćena su geodetski metodom geometrijskog nivelmana uz pomoć nivelira, što je najtočnija geodetska metoda mjerenja s točnošću određivanja visinskih razlika ispod 1 mm. Prije početka sanacije, maksimalno izmjereno slijeganje na pojedinim točkama iznosilo je 40 mm (točka 4, položaj na situacijskom prikazu slike 4., dijagram razvoja slijeganja, slika 5). Prije sanacije temeljenja, za određivanje slijeganja po dubini upotrijebljen je klizni mikrometar, a mjerenja u skladu su s geodetskim mjerenjima. Nakon sanacije temeljenja nastupa trend umirenja pomaka (slika 5.), [9].



Slika 4. Geodetske točke od 2006. godine i geodetske točke i pukotine s najvećim porastom širine tijekom 2016. i 2017 godine - lijevo, najveće pukotine i najveće slijezanje - desno

Kako bi se odredili horizontalni pomaci u tlu prema potpornom zidu, između zgrade gimnazije i potpornih zidova instalirani su inklinometri. Dodatno, nagninjanje zidova prema potpornim zidovima i nagninjanje od njih, kao i eventualno nagninjanje samih potpornih zidova, opaža se pomoću klinometara ugrađenih na različitim visinama na potpornim zidovima i zidovima gimnazije. Mjerenja horizontalnih pomaka moguće je nadopuniti i poboljšanjem geodetskog sustava mjerenja pomoću trigonometrijskog nivelmana koristeći totalnu stanicu odgovarajućih karakteristika. Za to je potrebno izvršiti posebnu stabilizaciju točaka geodetske osnove izvan područja deformabilne zone čime bi se proširilo područje pod opažanjem. Ova poboljšanja bila bi nužna u slučaju značajnijeg razvoja nepovoljnih pojava.



Slika 5. Slijezanja kontrolnih repera na zgradi gimnazije u Vukovaru [9]

4 Zaključak

Na zgradi gimnazije u Vukovaru, građene na lesnom platou u čijem podnožju su izvedeni potporno obložni zidovi, nekoliko godina nakon poslijeratne obnove i početka korištenja počele su se javljati pukotine i slijeganja pojedinih temelja. Postojanje provlaženog lesnog tla, blizina pokosa pridržanog potpornim zidovima, podrumi u podnožju tih potpornih zidova čiji su se svodovi počeli zarušavati, bili su povod za provedbu opsežnih istražnih radova u tlu i ugradnju sustava mjerenja i opažanja te sanaciju temeljenja najviše oštećenog dijela zgrade. Nemogućnost pravodobne i cjelokupne sanacije ostavila je prostor razvoju dodatnih nepovoljnih pojava – počinju se uočavati pomaci i slijeganja. Navedene pojave poticaj su za razradu cjelovitih mjera sanacije. Kao podloge kompleksnim analizama koje prethode izradi projektnog rješenja sanacije koriste se rezultati opažanja i mjerenja kao i rezultati svih drugih istražnih radova u tlu koji pridonose izradi optimalnog rješenja sanacije.

Literatura

- [1] Nadilo, B.: Donacijska obnova zgrada javne namjene u Vukovaru, Građevinar, 53, (2001) 10, pp. 661 -667.
- [2] Web stranica Gimnazije u Vukovaru, link (http://gimnazija-vukovar.skole.hr/skola/slike_gimnazije_od_1991_do_1999_), pristupljeno: 28.10.2016.
- [3] Mulabdić, M., Minažek. K.: Foundation improvement for a building on loess soil, Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hamza et al (ur.), Alexandria, Egipat, pp. 2362-2365, 2009.
- [4] Minažek, K.: Geotehnička mjerenja kod sanacije temeljenja Gimnazije u Vukovaru, Zbornik 6. savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva: Sanacija, tehničko praćenje i održavanje u geotehnici, Matešić, L., Sokolić, I. (ur.), Zadar, Hrvatsko geotehničko društvo, pp. 90-92, 2013.
- [5] Građevinski fakultet Osijek: Gimnazija Vukovar, Geotehnički projekt - sanacija temeljenja, Osijek, srpanj 2007.
- [6] Građevinski fakultet Osijek: Gimnazija Vukovar, završni izvještaj o geotehničkim mjerenjima od početka 19.4.2007. do 28.11.2012., Osijek, prosinac 2012.
- [7] Građevinski fakultet Osijek: Geotehnički elaborat, Osijek, listopad 1998.
- [8] Građevinski fakultet Osijek: Gimnazija Vukovar, Geotehnički elaborat, Osijek, svibanj 2017.
- [9] Građevinski fakultet Osijek: Izvještaj o geotehničkim mjerenjima gimnazije Vukovar do datuma 24.5.2017., Osijek, svibanj 2017.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Čelične konstrukcije

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.08>

Posebnosti projektiranja membranskih konstrukcija

Elizabeta Šamec, Maja Baniček

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
kontakt: esamec@grad.hr

Sažetak

Ukratko su prikazane osnovne karakteristike membranskih konstrukcija te su opisani koraci u postupku projektiranja i izgradnje membranskih konstrukcija s njihovim specifičnostima. Posebna je pozornost posvećena postupku proračuna membranskih konstrukcija. Istaknuto je temeljno obilježje po kojem se te konstrukcije razlikuju od konvencionalnih tipova konstrukcija – nalaženje oblika, te su navedeni neki djelomice neriješeni problemi koji postoje u proračunu zbog nedostatka europskih norma za taj tip konstrukcija. Proveden je proračun membranske konstrukcije po uzoru na postojeću konstrukciju u sklopu zgrade zračne luke Zadar u kompjutorskom programu IxCube. Prikazani su pomaci membrane za djelovanje vjetra te je konstrukcija provjerena na gomilanje padalina.

Ključne riječi: *membranska konstrukcija, proračun laganih konstrukcija, nalaženje oblika*

Particularities in the structural design of membrane structures

Abstract

Main characteristics of membrane structures are briefly presented with overview of design and construction process particularities. Particular attention is given to the structural design of tensile membrane structures. Form-finding, i.e. the main aspect by which they differ from more conventional structural types, is emphasized and some partly unsolved problems in structural design due to lack of European standard are outlined. Design of membrane structure, inspired by existing structure within the Zadar airport, is conducted with computer software IxCube. Membrane displacements for wind load are presented and the structure is verified for rain and snow accumulation.

Keywords: *membrane structures, structural design of lightweight structures, form finding*

1 Uvod

Membranske konstrukcije, kako privremene, tako i trajne, prisutne su preko 50 godina, a primjenu nalaze od jednostavnih samostojećih tendi do kompleksnih krovnih konstrukcija. Danas se membranske konstrukcije najčešće upotrebljavaju kao krovni sustavi za natkrivanje stadiona, tržnica, zračnih luka, kolodvora, kao zaštita arheoloških nalazišta, oplata za izgradnju ljusaka ili u ulozi fasada za smanjenje zagrijavanja od sunca [1].

Zbog atraktivnoga arhitektonskog oblika membranske konstrukcije često postaju simbolom grada. No te konstrukcije nisu samo privlačne izgledom, već su i konstrukcijski zanimljive, a posjeduju i određene ekonomske i ekološke prednosti u odnosu na klasične konstrukcije. Razvoj membranskih i sličnih tipova konstrukcija potaknut je pojavom samooblikovanja prirodnih struktura (npr. paukova mreža), koje su visoko optimizirane po pitanju odnosa težine, površine i čvrstoće. Ako je konstrukcija napravljena od fleksibilnoga materijala (uže, platno), koji nije u mogućnosti prenijeti tlačnu silu i moment savijanja, konstrukcija će se "prilagoditi" pod opterećenjem i zauzeti ravnotežni oblik. Mijenjajući rubne uvjete može se indirektno utjecati na oblik membranske konstrukcije sve dok se ne postigne željena forma.

Za razliku od klasičnih konstrukcija kod kojih su stabilnost i prijenos sila omogućeni težinom i materijalnom krutošću, kod sustava ovisnih o obliku sam oblik definira način nošenja i suprotstavljanja utjecajima na konstrukciju [2]. Membranski i pneumatski sustavi te sustavi mreže kabela nosivi su sustavi koji prenose opterećenja vlačnim silama u elementima. Konstrukcija tako posjeduje samo uzdužnu vlačnu krutost, pa se nosivost i geometrijska krutost moraju postići povoljnim oblikovanjem i prednapinjanjem. Možemo stoga reći da se vlačne gipke konstrukcije ponašaju prema principu eng. *form follows force* [3]. Oblik konstrukcije nije odabran, već slijedi iz uvjeta ravnoteže, uvažavajući rubne uvjete i razdiobu prednaponskih sila, a u kabelskim sustavima i topologiju mreže elemenata, te često ne može biti opisan jednostavnim matematičkim funkcijama. Problem nalaženja oblika (eng. *form finding*) zapravo je potraga za stabilnom minimalnom plohom, problem kojim se matematičari bave već desetljećima.

Dok je čvrstoća tlačnih elemenata ograničena pojavom izvijanja, vlačni se elementi mogu opterećivati gotovo do granice tečenja materijala, čime su materijal i poprečni presjek u potpunosti iskorišteni. Posljedica je toga vrlo mala, pa čak i zanemariva vlastita težina, odnosno visok omjer nanesenoga opterećenja prema vlastitoj težini u usporedbi s klasičnim čeličnim ili betonskim konstrukcijskim sustavima. To ih čini superiornima prilikom odabira konstrukcija za svladavanje velikih raspona [2].

2 Postupak projektiranja i izgradnje membranskih konstrukcija

Iako se membranske konstrukcije doimaju jednostavnima i elegantnima, za njihovo je oblikovanje potrebno mnogo specifičnoga inženjerskog znanja i iskustva. Kompleksnost projektiranja proizlazi iz geometrijske nelinearnosti konstrukcije i promjene njezinoga oblika uzrokovane djelovanjima ili relaksacijom vlačnih elemenata. Početni oblik membranske konstrukcije ne ovisi isključivo o zamisli arhitekta, već je rezultat preliminarnoga statičkog proračuna koji nazivamo nalaženje oblika, a koji osigurava da je svaka točka konstrukcije u ravnotežnom stanju, što se postiže početnim prednapinjanjem vlačnih elemenata. Stoga je vrlo važno da u fazi projektiranja membranskih konstrukcija budu uključeni ne samo arhitekti i projektanti konstrukcije, već i izvođači pa čak i proizvođači materijala. Projektiranje membranskih konstrukcija tako postaje iteracijski proces prema arhitektonski zanimljivom, a statički učinkovitom obliku konstrukcije. Proces projektiranja sadrži 4 glavne faze: nalaženje oblika, proračun konstrukcije, krojenje i izradu radioničkih nacрта te izvedbu.

2.1 Nalaženje oblika

Prvi je korak pri projektiranju membranskih konstrukcija pronalaženje početnoga, ravnotežnog oblika. On se određuje pomoću specijaliziranih kompjutorskih programa, a ponekad još uvijek i pomoću fizičkih modela. Standardni građevinski kompjutorski programi nisu pogodni za nalaženje oblika, jer se koriste numeričkim postupcima koji su jako osjetljivi na odabir inicijalnoga oblika, te će konvergirati k rješenju samo ako je taj oblik dovoljno blizak konačnom. U ovom se koraku u obzir ne uzimaju vanjska djelovanja, ali se nanosi početno prednapinjanje kojim se kontrolira i po potrebi mijenja početni oblik te se osigurava da ne dolazi do gubitka vlačnih naprezanja odnosno nestabilnosti konstrukcije. Dobiveni oblik membrane s kojim se nastavlja proračun konstrukcije funkcija je omjera naprezanja u glavnim smjerovima platna (osnove i ispune) i rubnih uvjeta. Usporedba postojećih metoda za nalaženje oblika mreža kabela dana je u [3], a za membrane pregledni rad takvoga tipa još ne postoji.

2.2 Proračun konstrukcije

Sljedeći korak je proračun konstrukcije, u kojemu se u obzir uzimaju vanjska djelovanja koja se nanose na početni oblik dobiven u prvom koraku. Iako membranske konstrukcije postoje već pola stoljeća i postoji podosta znanja o njihovu projektiranju, njihov proračun nije popraćen europskom normom. Proračun krutoga dijela konstrukcije koji podupire vlačnu konstrukciju uobičajeno se provodi po pripadajućim normama Eurokod, ovisno o tome je li riječ o čeliku, drvu ili aluminiju. No, najzahtjevniji dio proračuna koji se odnosi na membranu zbog njezine fleksibilnosti i kompleksne prostorne zakrivljenosti najčešće nije pokriven europskom normom. Jedina europska

norma trenutno dostupna za membranske konstrukcije jest [4] no njezino je područje primjenjivosti ograničeno na privremene šatore tlocrtno ploštine veće od 50 m². Projektanti su tako primorani oslanjati se na smjernice dane u [5] i u nedavno objavljenom tehničkom izvješću radne skupine za membranske konstrukcije [1] unutar CEN/TC 250. Cilj je smjernica razviti jedinstven standardiziran pristup proračunu i izgradnji membranskih konstrukcija, kao i opsežnu europsku normu do 2024. godine.

Osim prednapinjanja, djelovanja koja uzimamo u proračun odgovaraju djelovanjima na klasične konstrukcije. Ipak, membranske konstrukcije osjetljive su na nejednoliko raspodijeljeno opterećenje, a točno određivanje raspodjele opterećenja izuzetno je teško s obzirom na njihovu razvedenu površinu. Stoga vrijednosti iz [6] često ne odgovaraju stvarnim djelovanjima, a kako europska norma ne postoji, veliku ulogu igraju iskustvo i ispitivanja na fizičkim modelima. Dominanta su vanjska djelovanja opterećenje snijegom i opterećenja zbog djelovanja vjetra kao i opterećenje zbog održavanja. Opterećenja koja se mogu zanemariti vlastita su težina (0,7-2,0 kg/m² [4]) zbog minimalnoga utjecaja na ponašanje, temperaturna opterećenja koja uglavnom imaju puno manji utjecaj nego kod klasičnih krutih konstrukcija (osim za mreže kabela) te potresno opterećenje pošto membranske konstrukcije imaju vrlo malu specifičnu težinu. Konstrukcija bi također trebala biti projektirana tako da se kišnica prirodno odvodi, pa se opterećenje kišom u tom slučaju može zanemariti, ali se konstrukcija mora provjeriti na gomilanje padalina u obliku snijega i/ili leda. Moguća točkasta opterećenja (rasvjetna tijela ili sportska oprema) moraju se izbjegavati na membranskom dijelu konstrukcije te se postavljaju na potpurnu konstrukciju. Vjetar je zbog lakoće i velike površine membrane redovito kritično djelovanje, a treperenje se može spriječiti dovoljnom zakrivljenošću plohe i prednapinjanjem. Kod klasičnih se konstrukcija tlak vjetra definira dinamičkim tlakom pomnoženim koeficijentom tlaka (c_p), a njegova se promjena s obzirom na promjenu geometrije uzrokovanu vjetrom zanemaruje. No ta pretpostavka ne vrijedi za gipke konstrukcije, pa su u [5] dani koeficijenti tlaka za učestale oblike membranskih konstrukcija (pergola, jedro, itd.). Dodatno se na dinamičko djelovanje vjetra provjeravaju konstrukcije velikih raspona, kao i one sa slobodnim rubovima. Za konstrukcije kompliciranije geometrije treba provesti ispitivanje u vjerovnom tunelu. Projektiranje membranskih konstrukcija u velikoj mjeri ovisi o iskustvu i osobnoj procjeni inženjera, npr. treba li prednapinjanje uzeti kao opterećenje ili kao svojstvo krutosti pri provjeri graničnoga stanja nosivosti i uporabljivosti [1], što još uvijek nije definirano. Zbog velike geometrijske nelinearnosti i ovisnosti geometrije ne samo o vrijednosti, već i o raspodjeli opterećenja, trenutno se vode rasprave i o pravilnoj primjeni parcijalnih faktora te kombinacijama opterećenja, što se može se pronaći u [1, 5].

2.3 Krojenje, izrada radioničkih nacrti i izvedba konstrukcije

Radionički nacrti krojeva platna nacrti su kojima se trodimenzionalna površina platna pretvara u dvodimenzionalne površine (šablone) za izradu krojeva. Tako izrezani komadi platna kasnije se spajaju varenjem ili lijepljenjem kako bi se dobio trodimenzionalni oblik konstrukcije. Izvedba membranskih konstrukcija razlikuje se od standardne gradnje, a izvođač mora biti uključen u projekt od samoga početka. Njegova prisutnost potrebna je u fazi donošenja odluka o veličini i geometriji dijelova platna koji se ugrađuju kao i u odabiru smjera u kojem će se materijal polagati, što utječe na proračun konstrukcije, na krojenje i na način pakiranja platna. Radnje poput pripreme, polaganja, spajanja, podizanja, vješanja i prednapinjanja platna zahtijevaju posebno obučene radnike, a često i veliku ploštinu gradilišta te mnogo mehanizacije. Prednapinjanje membrane ključan je proces u izgradnji, koji ovisi o preciznoj razradi oblikovanja detalja spojeva membrane na konstrukciju kao i plana predapinjanja, jer se oprema za prednapinjanje (mehanička, hidraulička ili električna) zbog svoje težine može premještati isključivo dizalicom. Puno više o specifičnostima izvedbe membranskih konstrukcija i ekonomskim aspektima može se pronaći u [7, 8].

3 Primjer proračuna membranske konstrukcije

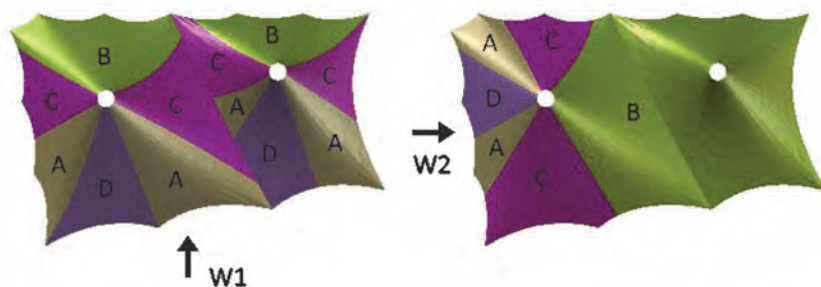
U nastavku je prikazan i ukratko opisan proračun membranske konstrukcije po primjeru već izvedene konstrukcije u sklopu zgrade zračne luke Zadar u Zadru. Spajanjem dvaju jedara s visokom točkom dobiven je šatorasti oblik membrane. Tlocrtni su gabariti konstrukcije dimenzija 22 x 13 m, a visina je visokih točaka 8 m. Odabrana je membrana tipa II napravljena od platna s PVC premazima, a kabeli su spiralni, poprečnoga presjeka 1 x 37 i 1 x 61 od čelika galvanizirani galfanom. Vanjski kabeli su promjera 12 mm, dok je unutarnji kabel, koji spaja dva jedra, promjera 20 mm.



Slika 1. Inicijalni oblik membrane (lijevo) i početni oblik dobiven pomoću metode gustoća sila (desno)

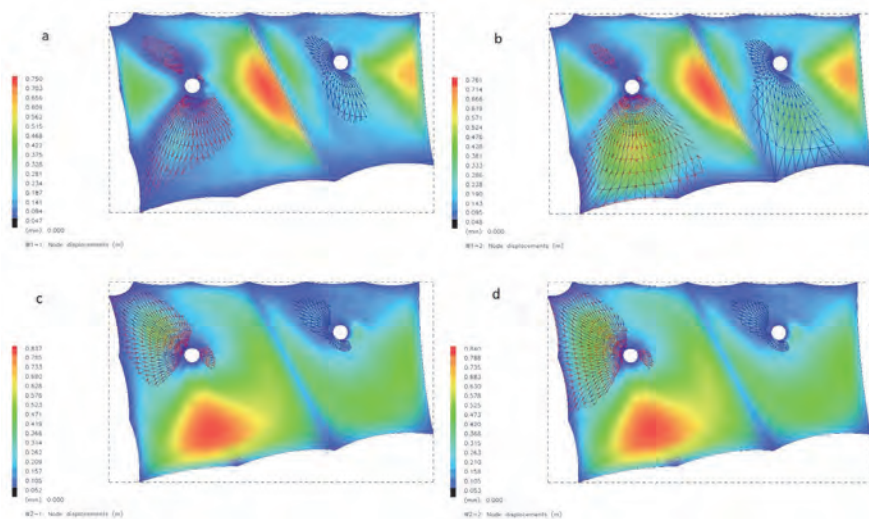
Kako bi se spriječilo gomilanje snijega u središnjem dijelu membrane te njezino treptenje zbog dinamičkoga djelovanja vjetra, potrebna je napetost membrane, što je postignuto prednapinjanjem inicijalnoga oblika u prvom koraku postupka. Minimalni, a ujedno i početni oblik membrane pronađen je pomoću metode gustoća sila (eng. *Force Density Method*) u računalnom programu IxCube [9], a prikazan je na slici 1. Sljede-

či je korak nanošenje opterećenja na dobiveni početni oblik membrane. Opterećenje snijegom i iznosi opterećenja od djelovanja vjetra dobiveni su uz pomoć smjernica [5] i nacionalnih dodataka [6], a proračun konstrukcije s opterećenjima od djelovanja vlastite težine, snijega i vjetra proveden je iteracijskim postupkom, teorijom II. reda.



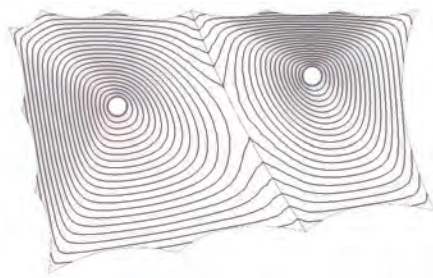
Slika 2. Sheme opterećenja zbog djelovanja vjetra prema smjercima [4]

Sheme djelovanja vjetra prikazane su na slici 2., a pripadajući pomaci u odnosu na početni oblik membrane (vidljiv u obliku mreže) prikazani su na dijagramima na slici 3.



Slika 3. Dijagrami pomaka za opterećenje vjetrom: a) smjer vjetra W1 odižuće, b) W1 pritiskujuće, c) smjer vjetra W2 odižuće, d) W2 pritiskujuće

Za membranu je provedena i provjera na moguće gomilanje padalina pomoću prikaza izolinija za oblik membrane pod opterećenjem snijegom. Na membrani neće doći do gomilanja padalina, jer, kako je vidljivo iz slike 4., izolinije niti na jednom mjestu ne zatvaraju poligon.



Slika 4. Prikaz izolinija s visinskim razlikama od 20 cm

4 Zaključak

Cilj je ovoga rada upozoriti na nedostatak europske norme, što otežava i onako specifičan postupak projektiranja membranskih konstrukcija. Aktualnost ovoga problema očituje se u činjenici da se u okviru CEN-a radi na normi koja će, nadamo se, odgovoriti na dvojbe istaknute u članku. Svakako, iskustvo i specifično znanje projektanata ostat će neizbježna potreba, ali uređena europska norma značajno će olakšati projektiranje i zasigurno pridonijeti popularizaciji ovoga tipa konstrukcija.

Zahvala

Rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom IP-2014-09-2899.

Literatura

- [1] Stranghöner, N., Uhlemann, J., Bilginoglu, F., Bletzinger, K.U., Bögner-Balz, H., Corne, E., Gibson, N., Gosling, P., Houtman, R., Llorens, J. i drugi: Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures, 2016.
- [2] Šamec, E., Fresl, K.: Ocjena primjenjivosti bezmrežnih postupaka u oblikovanju prednapetih gipkih konstrukcija, 1. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Lakušić, Stjepan (ur.), Zagreb, Građevinski fakultet u Zagrebu, pp. 159-166, 2015.
- [3] Veenendaal, D., Block, P.: An overview and comparison of structural form finding methods for general networks, International Journal of Solids and Structures, 49 (2012) 26, pp. 3741–3753

- [4] HRN EN 13782:2015 – Privremene konstrukcije – Šatori – Sigurnost
- [5] Forster, B., Mollaert, M.: European design guide for tensile surface structures, TensiNet, 2004.
- [6] HRN EN 1991 – Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukcije – Svi dijelovi i nacionalni dodaci
- [7] Seidel, M.: Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction, 2009.
- [8] Šamec, E.: Economic aspects and particularities in building of lightweight tensile structures, Proceedings of the 12th International Conference: OTMC, Cerić A., Kotarytarova J., Radujković M., Vukomanović M., Završki I. (ur.), Primošten, Hrvatska Udruga za organizaciju građenja i Sveučilište u Zagrebu, 122–135, 2015.
- [9] ixCube (v. 2.35), ixRay l.t.d., 2016, <http://www.ixcube.com>, studentska verzija

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.31>

Procjena životnoga vijeka zbog umora primjenom lokalnog pristupa Hot Spot

Boris Fuštar¹, Ivan Lukačević², Darko Dujmović²

¹ Projektni biro P45 d.o.o.

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatska

kontakt: borisfustar@hotmail.com

Sažetak

Prilikom procjene preostalog životnog vijeka čeličnih detalja izloženih umoru najčešće se zbog jednostavnosti proračuna primjenjuje S-N metoda uz globalni pristup preko nominalnih naprežanja. Ta metoda na strani djelovanja zanemaruje lokalne utjecaje poput koncentracija naprežanja uzrokovanih lokalnom promjenom u geometriji detalja. Ovi se utjecaji indirektno uzimaju na strani otpornosti pomoću eksperimentalno dobivenih S-N krivulja. Ako se radi o geometrijski složenijem detalju ili je detalj opterećen složenim stanjem naprežanja, primjenjuju se lokalni pristupi kojima se prilikom proračuna uzimaju u obzir lokalni utjecaji. Ovaj rad prikazuje procjenu životnoga vijeka zavarenoga čeličnog detalja dodatne lamele izloženog umoru. Detalj je sastavni dio čelične konstrukcije željezničkoga mosta, a procjena se provodi lokalnim pristupom preko hot spot naprežanja. Naprežanja se određuju mjerenjem deformacija na određenim mjestima u detalju zbog prolaza karakterističnih vlakova. Karakteristični vlakovi sastavni su dio modela opterećenja formiranoga prema podacima Hrvatskih željeznica. Na taj se način proračunava životni vijek zavarenoga detalja zbog umora, a rezultati se uspoređuju sa životnim vijekom istoga detalja dobivenog pristupom preko nominalnih naprežanja.

Ključne riječi: životni vijek zbog umora, lokalni pristup Hot Spot naprežanja, zavareni detalj

Fatigue life assessment by using local Hot Spot approach

Abstract

During the assessment of remaining fatigue life of the welded details that are prone to fatigue, S-N method with global nominal stress approach is the most common method due to its simplicity. This method neglects local action effects such as stress concentrations due to local geometry changes in detail. These effects are indirectly included on the resistance side through experimentally obtained S-N curves. In cases of more complex detail or if the detail is loaded with a complex stress state, local approaches which take local effects into account during calculations are used. This paper presents a fatigue life assessment of fatigue prone cover plate welded steel detail. Detail is a part of the steel railway bridge structure and assessment is made by local hot spot stress approach. Stresses are determined based on strain measurements on specific locations in the detail, due to the passage of characteristic trains. Characteristic trains are an integral part of a load model formed by data from Croatian Railways. Accordingly, the fatigue life of the welded detail is calculated and the results are compared with fatigue life of the same detail which is determined based on the nominal stress approach.

Keywords: fatigue life, local Hot Spot stress approach, welded detail

1 Uvod

Najraširenija je i najjednostavnija metoda za procjenu životnoga vijeka čeličnih detalja izloženih umoru S-N metoda uz globalni pristup preko nominalnih napreznja. Nominalno se napreznje određuje pomoću klasične mehanike konstrukcija zanemarujući lokalne utjecaje poput koncentracije napreznja unutar detalja, koji se u tom slučaju uzimaju u obzir na strani otpornosti. Ako se radi o geometrijski složenijemu detalju ili je detalj opterećen složenim stanjem napreznja, primjenjuju se lokalni pristupi poput pristupa preko hot spot napreznja ili efektivnoga napreznja u zarezu [1, 2]. Lokalne procjene umora temelje se na proračunu napreznja na očekivanu mjestu nastanka pukotine, uzimajući pri tome u obzir lokalne utjecaje. Cilj ovoga rada procjena je životnoga vijeka zbog umora zavarenoga detalja dodatne lamele koja je sastavni dio čelične konstrukcije željezničkoga mosta "Kupa Karlovac" primjenom lokalne hot spot metode. Izračunani se životni vijek uspoređuje sa životnim vijekom detalja određenim na temelju nominalnih napreznja i preuzetim iz [3]. Za procjenu se rabe modeli opterećenja određeni na temelju izmjerenih deformacija na određenim mjestima u detalju zbog prolaza karakterističnih vlakova [3]. Mjerodavne razlike napreznja dobivene na temelju stvarnih opterećenja uspoređuju se s preporučenom S-N krivuljom otpornosti iz EC3 [4].

2 S-N metode procjene umora

Kako bi se provela procjena preostalog životnog vijeka postojećih konstrukcija, treba prije svega identificirati i kategorizirati kritične detalje sa stajališta umora. Procjena se najčešće temelji na S-N metodi, što se često predlaže i u normama [4], [5]. Kritični se detalj svrstava u kategoriju s pripadajućom S-N krivuljom koja predstavlja njegovu otpornost na umor. S-N krivulje određuju se eksperimentalnim ispitivanjima različitih uzoraka izloženih promjenjivim napreznjima konstantnih i promjenjivih amplituda. Svaka se od S-N krivulja prema EC3 identificira karakterističnom otpornošću kod umora pri $N = 2 \cdot 10^6$ promjena napreznja, odnosno kategorijom detalja. Osnova je za proračun životnoga vijeka zavarenoga detalja zapis napreznja od stvarnog opterećenja. Iz zapisa napreznja u vremenu, koje je po prirodi stohastičkog karaktera, može se pomoću metoda prebrojavanja kao što su metoda rezervoara ili metoda toka kiše [1, 6, 7] dobiti niz razlika napreznja konstantnih amplituda s pripadajućim brojem ponavljanja. Tako dobivene konstantne amplitude nazivaju se spektrom ili histogramom napreznja i rabe se za daljnji proračun životnoga vijeka. Svaka se razlika napreznja s pripadnim brojem ponavljanja promatra kao doprinos ukupnom oštećenju detalja umorom. Ukupno se oštećenje određuje Minerovom hipotezom linearne akumulacije oštećenja [8]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

U izrazu (1) n_i je broj promjena razlika naprezanja konstantne amplitude $\Delta\sigma_i$, a N_i broj promjena naprezanja $\Delta\sigma_i$ do otkazivanja.

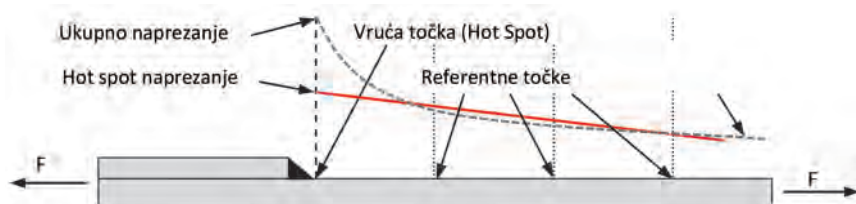
2.1 Pristup utemeljen na nominalnim napreznjima

Najjednostavniji pristup za proračun djelovanja umora u obliku mjerodavnih razlika naprezanja pristup je utemeljen na nominalnim napreznjima koja se proračunavaju pomoću klasične mehanike konstrukcija, zanemarujući već spomenute lokalne utjecaje. Ovakvi lokalni utjecaji indirektno se uzimaju u obzir na strani otpornosti pomoću eksperimentalno dobivenih S-N krivulja. Nominalno se napreznje tada uspoređuje s pripadajućom S-N krivuljom. U pojedinim slučajevima nije moguće izračunati nominalno napreznje ili se detalj zbog složene geometrije ne može svrstati u kategoriju danu normama. Tada se primjenjuju napredniji lokalni pristupi.

2.2 Hot Spot pristup

Jedan od lokalnih pristupa, kojim se ujedno povećava i preciznost procjene umora [1], jest hot spot pristup. Hot spot napreznje predstavlja razliku napreznja u očekivanom mjestu nastanka pukotine (rub vara). Ono se određuje mjerenjima na konstrukciji ili metodom konačnih elemenata koja omogućuje modeliranje stvarne geometrije detalja [9, 10]. Hot spot napreznje uzima u obzir utjecaj lokalne geometrije, ali isključuje nelinearnu komponentu napreznja od samoga vara zbog utjecaja zarez, što se indirektno uzima na strani otpornosti pomoću eksperimentalno dobivenih S-N krivulja. U fazi dimenzioniranja ionako nije moguće unaprijed poznavati stvarnu geometriju vara, pa je ova pretpostavka opravdana. Hot spot pristup zahtijeva manji broj S-N krivulja, budući da one moraju uzeti u obzir manji broj parametara [1].

U slučaju mjerenja na postojećim konstrukcijama, u referentnim se točkama mjere deformacije iz kojih se izvode napreznja na temelju kojih se ekstrapolira hot spot napreznje (slika 1.).



Slika 1. Ekstrapolacija napreznja na mjesto hot spot-a

Referentne su točke u funkciji debljine ploče, te se nalaze na udaljenostima na kojima raspodjela naprezanja nije pod utjecajem geometrije vara. Ekstrapolirana razlika naprezanja predstavlja mjerodavnu razliku naprezanja koja se uspoređuje s odgovarajućom S-N krivuljom otpornosti. Smjernice i preporuke za ekstrapolaciju, kao i krivulje otpornosti za ovaj pristup, mogu se pronaći u [4, 5]. Hot spot pristup primjenjiv je ako promjenjiva naprezanja dominantno djeluju okomito na rub vara ili na kraju diskontinuiranoga uzdužnog vara uz pretpostavku da pukotina kod umora nastaje na rubu vara, a ne u njegovom korijenu.

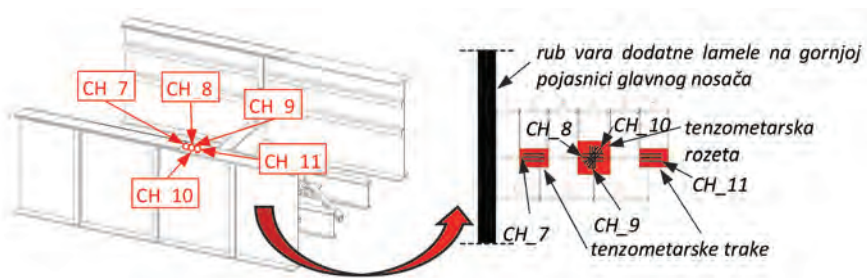
3 Primjena na primjeru čelične konstrukcije željezničkog mosta

3.1 Opis analiziranog detalja

Most "Kupa Karlovac" čelični je željeznički most pozicioniran na dionici M202 Zagreb-Rijeka. Izgrađen je 1873. i obnovljen 1945. Nova je čelična konstrukcija instalirana 1989. Most se sastoji od kontinuiranih zavarenih čeličnih nosača preko tri raspona (32,20 m + 38,42 m + 32,02 m). Budući da je kraj dodatne lamele jedan od kritičnih detalja sa stajališta umora [11], provedena su brojna ispitivanja ovoga detalja [12, 13]. Takav se detalj prema EC3 može svrstati u kategoriju 56 u slučaju pristupa preko nominalnih naprezanja, odnosno u kategoriju 100 za pristup preko hot spot pristupa [4].

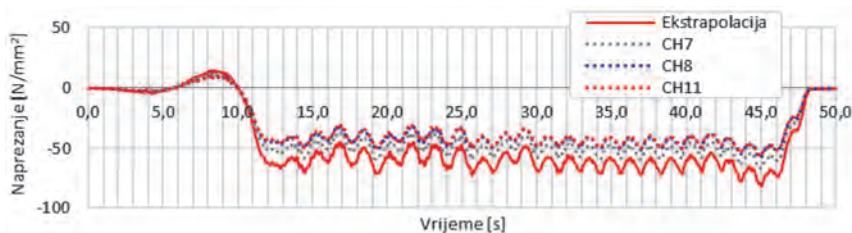
3.2 Provedba ispitivanja

Ispitivanje je provedeno u okviru doktorskoga rada [3]. Područje je ispitivanja gornja pojasnica glavnoga nosača na mjestu završetka dodatne lamele. Deformacije od stvarnoga opterećenja mjerene su tenzometrima postavljenima na određenim mjestima u detalju, prema slici 2.



Slika 2. Položaj mjernih uređaja (tenzometara) [3]

Rezultati ispitivanja dani su dijagramima naprezanja u vremenu (slika 3.). Naprezanja su izračunana uz pretpostavku linearnoelastičnoga ponašanja materijala s modulom elastičnosti $E = 210000 \text{ N/mm}^2$.

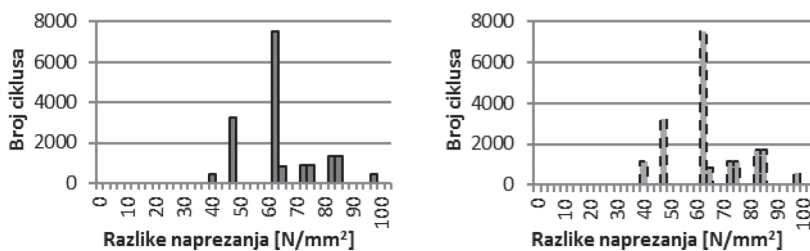


Slika 3. Izračunana naprezanja na pozicijama CH_7, CH_8 i CH_11 te vrijednost ekstrapoliranoga naprezanja zbog prolaza teretnoga vlaka 45906

Prema preporukama [5] u ovom se slučaju za određivanje hot spot naprezanja rabi kvadratna ekstrapolacija. Mjerni su uređaji postavljeni u referentnim točkama na udaljenostima $0,4t$, $0,9t$ i $1,4t$, gdje je t debljina pojasnice, slika 2. Ekstrapolacija naprezanja provodi se prema sljedećem izrazu:

$$\sigma_{hs} = 2,5\sigma_{0,4t} - 2,24\sigma_{0,9t} + 0,72\sigma_{1,4t} \quad (2)$$

Za svaki prolaz karakterističnoga vlaka dobiveni su zapisi naprezanja u vremenu (slika 3.). Slika 3. također prikazuje ekstrapolirane vrijednosti hot spot naprezanja dobivene pomoću izraza (2). Na temelju zapisa naprezanja u vremenu svakoga pojedinog vlaka iz modela opterećenja koji se sastoji od 5 putničkih i 7 teretnih vlakova dobiveni su histogrami razlika naprezanja prikazani na slici 4. Jedan histogram obuhvaća period od 1989. do 2013, a drugi period od 2013 godine.



Slika 4. Histogrami razlika naprezanja a) period 1989.-2013. b) period od 2013.

4 Rezultati i rasprava

Polazišna točka životnog vijeka konstrukcije je 1989. godina, budući da je tada zamijenjena čelična konstrukcija mosta. Primjenom izraza (2) u slučaju metode tolerantnosti oštećenja i metode sigurnoga vijeka te uzimajući u obzir male i velike posljedice otkazivanja [4] izračunani su ukupni životni vjekovi detalja prikazani u tablici 1. Nadalje, u tablici 1. su za usporedbu prikazani i rezultati za isti detalj dobiveni pristupom utemeljenom na nominalnim naprezanjima, preuzeti iz [3].

Tablica 1. Životni vjekovi detalja prema nominalnom i hot spot pristupu

Metoda procjene prema EC3	Posljedice otkazivanja	Životni vijek [godine]	
		Pristup utemeljen na nominalnim naprezanjima [3]	Hot Spot pristup
Tolerantnost oštećenja	Male posljedice $v_{M,f} = 1,00$	195	400
	Velike posljedice $v_{M,f} = 1,15$	130	234
Sigurni vijek	Male posljedice $v_{M,f} = 1,15$	130	234
	Velike posljedice $v_{M,f} = 1,35$	81	124

Prema tablici 1., primjenom lokalnoga hot spot pristupa pod pretpostavkom da neće doći do povećanja prometnoga opterećenja može se uočiti puno veći životni vijek u odnosu na životni vijek proračunan prema pristupu utemeljenom na nominalnim naprezanjima. Na temelju prikazanih rezultata zaključuje se da hot spot pristup pruža mogućnost preciznije procjene, odnosno, da pristup preko nominalnih naprezanja podcjenjuje životni vijek detalja. Prema tablici 1., ova se razlika posebice uočava kod životnoga vijeka detalja za sigurni vijek s velikim posljedicama. Za razliku od hot spot pristupa, pristupom preko nominalnih naprezanja se ne zadovoljava osnovni zahtijevani životni vijek čeličnoga mosta (100 godina).

5 Zaključak

Primjenom S-N metode izračunava se životni vijek zavarenoga detalja čelične konstrukcije željezničkog mosta. Globalni pristupi su jednostavniji za inženjerske procjene. Njima se indirektno na strani otpornosti (S-N krivulje) uzimaju u obzir lokalni utjecaji, a treba samo odrediti nominalno naprezanje na promatranu mjestu. Lokalni pristupi uzimaju veći broj parametara na strani djelovanja, čime se smanjuje potreban broj S-N krivulja. Na temelju prikazanih rezultata, zaključuje se da hot spot pristup rezultira duljim životnim vijekom analiziranoga detalja. Međutim, primjena hot spot pristupa kao složenije metode zahtijeva veće napore i povećava mogućnost pogreške. Bez obzira na preciznost metoda procjene umora zavarenih detalja bitnu ulogu i dalje ima opterećenje čiji se intenzitet i učestalost vrlo teško mogu pretpostaviti.

Literatura

- [1] Radaj, D., Sonsino, C.M. Fricke, W.: Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, 2. izdanje, UK: Woodhead Publishing 2004.
- [2] Ye, X., Su, Y., Han, J.: A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Assessment of Steel Bridges, Math. Probl. Eng., 2014, pp. 1–13.
- [3] Lukačević, I.: Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izloženih umoru, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [4] EN 1993-1-9, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-9: Fatigue, vol. 3. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2005.
- [5] Hobbacher, A.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, IIW document IIW-2259-15, Springer International Publishing, 2015.
- [6] Matsuishi, M., Endo, T.: Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress - Fatigue Lives under Random Loading, Preliminary Proceedings of The Kyushu District Meeting, Fukuoka, Japan, The Japan Society of Mechanical Engineers, 1968.
- [7] Downing, S.D., Socie, D.F.: Simple rainflow counting algorithms, Int. J. Fatigue, 4 (1982) 1, pp. 31–40
- [8] Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue, J. Appl. Mech., 12 (1945), pp. 159–164
- [9] Liu, R., Liu, Y., Ji, B., Wang, M., Tian, Y.: Hot spot stress analysis on rib-deck welded joint in orthotropic steel decks, J. Constr. Steel Res., 97 (2014), pp. 1–9
- [10] Savaidis, G., Vormwald, M.: Hot-spot stress evaluation of fatigue in welded structural connections supported by finite element analysis, Int. J. Fatigue, 22 (2000) 2, pp. 85–91
- [11] Haghani, R., Al-Emrani, M., Heshmati, M.: Fatigue-Prone Details in Steel Bridges, Buildings, 2 (2012), pp. 456–476
- [12] Fisher, J., Frank, K., Hirt, M., McNamee, B.: Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams, Fritz Engineering Laboratory Report No. 334.2, 1969.
- [13] Albrecht, P., Lenwari, A.: Fatigue-Proofing Cover Plates, J. Brid En ASCE, 2007, pp. 275–283.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Potresno inženjerstvo

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.30>

Methods for determination of centre of stiffness and torsional radius in multi-storey buildings

Riste Volčev, Nikola Postolov

Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Faculty of Civil Engineering, Macedonia
kontakt: volcev@gf.ukim.edu.mk

Abstract

In order to compare the different approach for the calculation of eccentricity of centre of stiffness and centre of mass and torsional radius, four different five storey buildings with different degree of plan irregularity were created. Four procedures for determination of centre of stiffness and torsional radius, which differ among themselves according to the distribution of the lateral loading over height are presented. The value of the torsional radius is inversely proportional to the level of irregularity. By increasing of irregularity degree, the ratio between the eccentricity obtained for the first and for the fourth distribution, decreases. By comparing the results obtained for different lateral load distribution it can be noted that from the results obtained by one method, the structure can be defined as plan regular, while from another as plan irregular. First distribution is most conservative, while the fourth is most flexible. All base isolated models are characterized as regular in plan, which is an indicator of the advantages of the base isolated structures in case of irregularity in plan.

Keywords: *plan irregularity, centre of stiffness, torsional radius*

Metode za određivanje centra krutosti i torzijskog polumjera višekatnica

Sažetak

Četiri različite petokatnice, s različitim stupnjem nepravilnosti u tlocrtu, izgrađene su u svrhu uspoređivanja raznih pristupa za proračun ekscentričnosti centra krutosti, središta mase i torzijskog polumjera. U radu su prikazana četiri postupka za određivanje centra krutosti i torzijskog polumjera koji se međusobno razlikuju po raspodjeli bočnog opterećenja po visini. Vrijednost torzijskog polumjera obrnuto je proporcionalna stupnju nepravilnosti. Povećavanjem stupnja nepravilnosti, smanjuje se odnos između ekscentričnosti dobiven za prvu i četvrtu raspodjelu. Uspoređivanjem rezultata dobivenih za razne raspodjele bočnog opterećenja može se ustanoviti da se iz rezultata dobivenih jednom metodom konstrukcija može definirati kao građevina pravilnog tlocrta, dok rezultati druge metoda pokazuju da je tlocrt nepravilan. Prva je raspodjela najkonzervativnija a četvrta najfleksibilnija. Svi bazno izolirani modeli okarakterizirani su kao građevine pravilnog tlocrta, što je indikator prednosti bazno izoliranih konstrukcija u slučaju nepravilnosti u tlocrtu.

Ključne riječi: *tlocrtna nepravilnost, centar krutosti, torzijski polumjer*

1 Introduction

Irregularity in plan may have negative implication on the design process and on the behaviour of the structures exposed to earthquake loadin Structures with eccentricity between the centre of the mass and centre of stiffness or with a lack of minimal torsional rigidity can undergo coupled lateral and torsional motions during earthquakes, which can significantly increase the seismic demand. One of the possible solutions for reducing these side effects is the application of base isolation systems. Most of the seismic design codes contain provisions for control of structural irregularities. If the prescript criteria for regularity are not satisfied, certain restrictions related with the selection of method or numerical model for seismic analysis have to be done.

2 Criteria for plan irregularity

In principle, conventional designed structures with respect to the lateral stiffness and mass distribution shall be approximately symmetrical in plan with respect to two orthogonal axes. According to EN 1998-1 [1], buildings can be characterized as regular in plan, if six different conditions at all storey levels are satisfied. Some of these conditions are qualitative and can be checked in the preliminary design stage. The conditions that are based on the eccentricity between the centre of mass and the centre of stiffness or torsional radius, Eq. (1) and Eq. (2), are quantities that have to be calculated additionally.

$$e_{ox} \leq 0.3r_x, \quad e_{oy} \leq 0.3r_y \quad (1)$$

$$r_x \leq l_s, \quad r_y \leq l_s \quad (2)$$

In these equations $e_{ox/oy}$ is eccentricity and $r_{x/y}$ is torsional radius in the considered direction, while l_s is the radius of gyration of the floor mass in plan. In multi-storey buildings only approximate definitions of the centre of stiffness and of the torsional radius are possible, because those parameters are not uniquely defined and depend on the distribution of lateral loading with height.

3 Determination of centre of stiffness and torsional radius in multi storey structures

The centre of lateral stiffness is defined as point in plan with the property that any set of horizontal forces applied at floor levels through that point produce only translation of the individual storeys, without any rotation with respect to the vertical axis. Conversely, any set of storey torques produce only rotation at the floors about the vertical axis that passes through the centre of lateral stiffness, without horizontal displacement of that point at any storey. The torsional radius is defined as the square root of the ratio of the torsional stiffness and the lateral stiffness in the considered direction.

$$r_x = \sqrt{\frac{K_\theta}{K_y}}, \quad r_y = \sqrt{\frac{K_\theta}{K_x}} \quad (3)$$

Torsional radius, as a structural characteristic, represents the potential for torsional vibration of structure exposed to earthquake ground motion.

Because EN 1998-1 does not provide a procedure for determination of centre of stiffness and torsional radius, the national annex should include reference to documents that provide definitions of these structural characteristics in multi-storey buildings. In Figure 1 four procedures for determination of these characteristics, which differ among themselves according to the distribution of the lateral loading over height are presented.

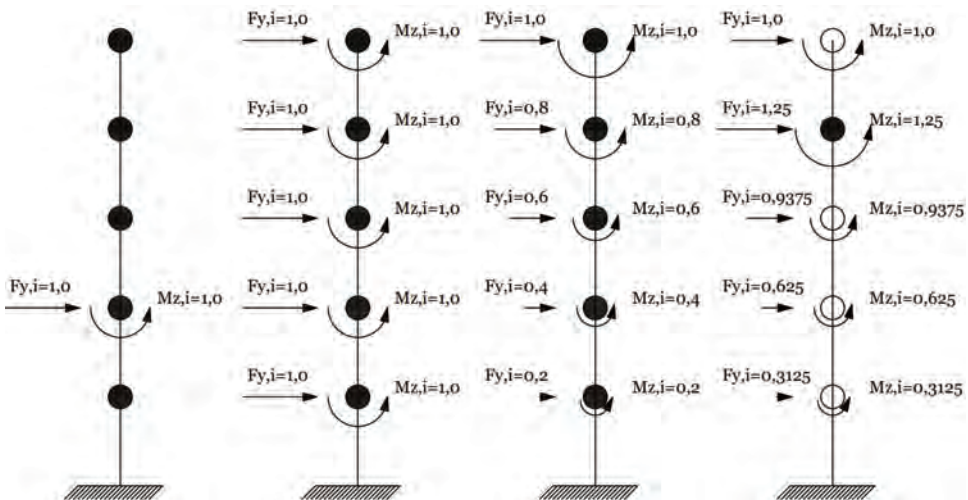


Figure 1. Schematic representation of methods for determination of centre of stiffness and torsional radius

According to Fajfar et al. [2], determination of these structural characteristics is performed for each level individually. Three static load cases are necessary to be defined for each storey level, two single forces in x and y direction and one torsional moment about the vertical axis, which are applied in the centre of mass. After determination of the centre of stiffness i.e. eccentricity, similar procedure is repeated for determination of the torsional radius, but in this step the loads are applied in the centre of stiffness. The second and the third method [3] for determination of these structural characteristics differ from the first. In these methods the lateral forces and torsional moments are not applied for each level individually, but to all levels simultaneously. The second method has uniform lateral load distribution over height, while the third has triangular. In the fourth method [4], the centre of stiffness and torsional radius are not determined by individual levels, but for the whole structure. The first step is determining horizontal lateral forces, which are proportional to the product of the floor mass and height i.e. are calculated according to the principle of equivalent static forces. The structure is analysed with applied torsional moments on each level, proportional to the forces. The centre of rotation of each level due to the action of the torsional moments is geometrically determined. The horizontal projection of the centre of rotation to 80 % of the total height of the structure is considered as the centre of stiffness of the whole structure. In the second step, horizontal forces in both directions, numerically equal to the torsional moments of the previous analysis, are applied to the centre of stiffness. With the results of this analysis, the torsional radius can be obtained.

4 Numerical example

4.1 Description of the analysed structures

In order to compare the different approach for the calculation of eccentricity of centre of stiffness and centre of mass and torsional radius, four different five storey buildings with different degree of plan irregularity were created. All analysed structures are rectangular in plan and consists three frames in x, and five frames in the global y direction, Figure 2. The distance between the frames is 5 m in both direction, while the story height is 3 m. The columns are rectangular with a dimensions 50/50 cm at the first two stories and 45/45 cm on the above 3 stories. All beams are 40/45 cm, as well as the slab's thickness is 15 cm. The first structure is regular. In the remaining three structures the middle column in the first frame in y direction is replaced with the RC wall with dimensions 120/40 cm, 160/40 cm and 200/40 cm respectively.

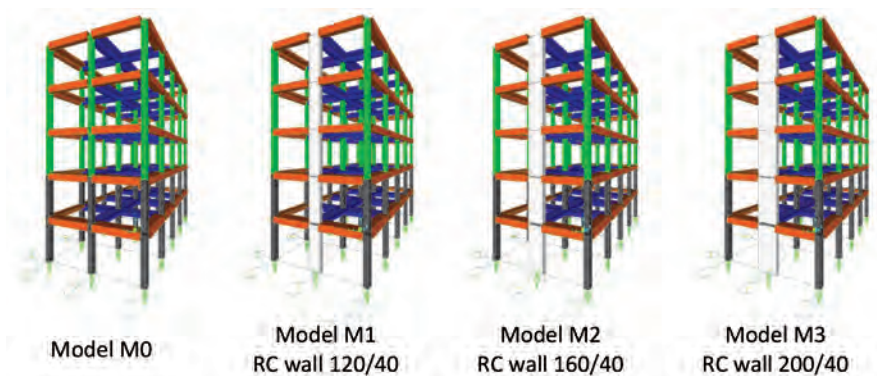


Figure 2. Mathematical models of analysed structures

For comparison, besides fixed base, the same models are analysed as base isolated. For the base isolated structures elastomeric bearings made by Italian company FIP Industriale are used. Selected isolator type SI-N 350/125 is with effective secant stiffness $K_{\text{eff}}=620\text{kN/m}$ and maximal displacement of 250 mm. The analyses are performed with the software SAP2000, for the both types of structures.

4.2 Comparison of results

In regular structures centre of mass and centre of stiffness are coincident. From the results presented in Figure 3 it can be concluded that by increasing of RC wall width the eccentricity of each level is also increasing. Eccentricity is the largest on the first floor and for structure M3 is in range of 3.23 to 5.51 m for the four distributions of lateral load. The largest differences between the centre of stiffness on the first and the last floor are obtained from the first lateral load distribution. The differences obtained from the second and from the third distribution are smaller. Centre of stiffness obtained from the fourth lateral load distribution is uniquely at all floors. This is due to the fact that centre of stiffness obtained at 80 % of the height of the structure is considered as a centre of stiffness of the whole structure. By increasing of irregularity degree, the ratio between the eccentricity obtained for the first and for the fourth distribution, decreases.

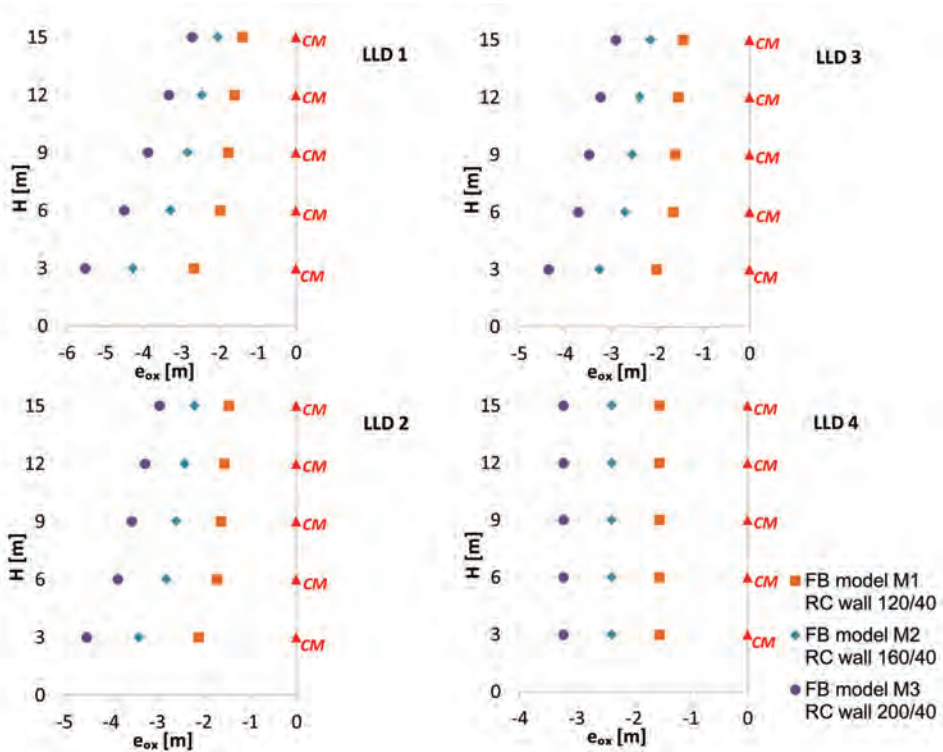


Figure 3. Eccentricity values of analysed structures for different lateral load distribution

The value of the torsional radius is inversely proportional to the level of irregularity, Figure 4. By increasing of RC wall width, the value of the torsion radius decreases. For the structure M1 is in range from 8.28 to 8.46 m, while for the structure M3 is in range from 7.40 to 8.39 m. Torsional radius is smallest on the first floor and increases on the upper levels. By comparing the results obtained for different lateral load distribution it can be noted that from the results obtained by one method, the structure can be defined as plan regular, while from another as plan irregular. The first distribution is most conservative, while the fourth is most flexible.

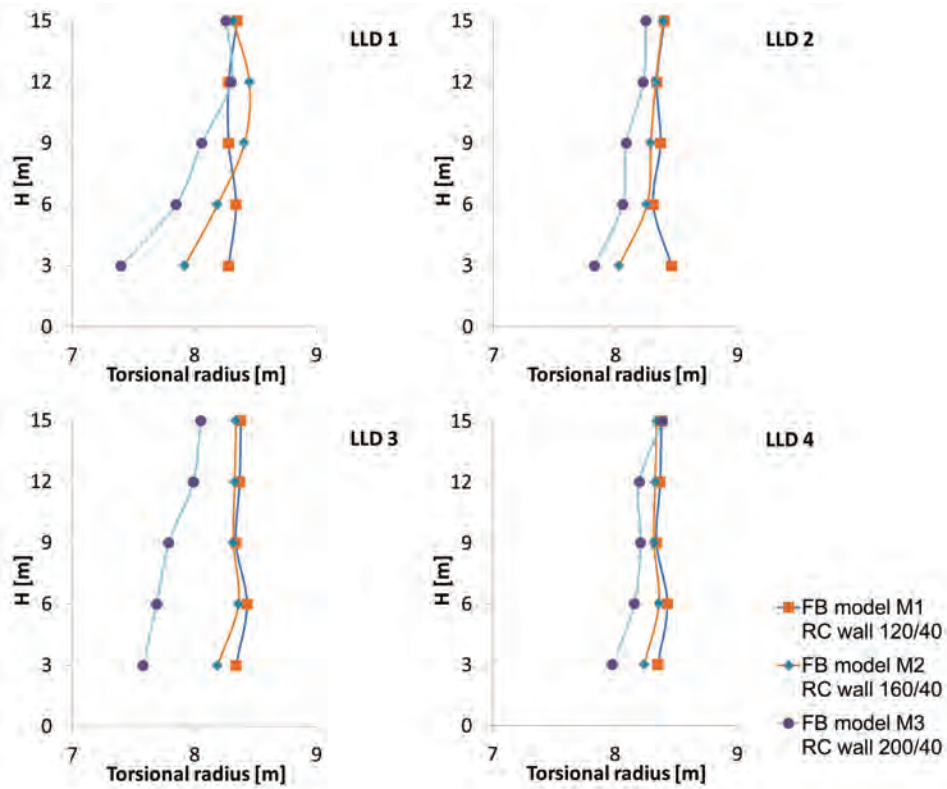


Figure 4. Values of torsional radius for different lateral load distribution

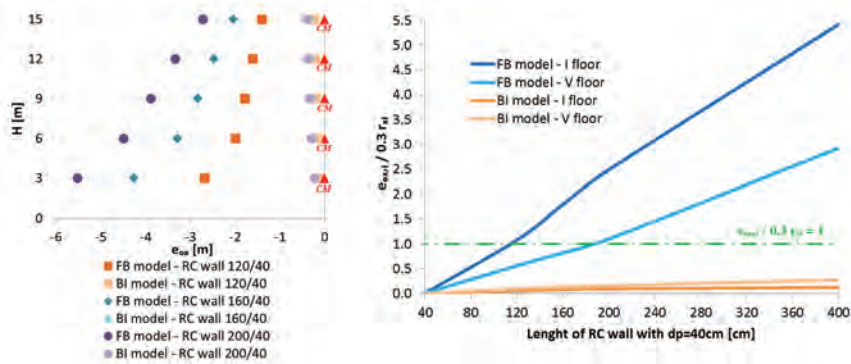


Figure 5. Obtained eccentricity for fixed and base isolated models and control of plan irregularity

Figure 5 present the coordinates of centre of stiffness, for fixed and base isolated models, with respect to the centre of mass at all storey levels, for first distribution of lateral load. From the presented results it can be noticed that at the fixed base models the eccentricity has highest value at the first storey and it decreases over height.

Conversely, at the base isolated models the eccentricities are highest at the top level and at the first storey are lower as far as 25 times with respect to fixed base models. From the graph it can be noted that all base isolated models comply the condition $e_{ox,i} < 0.3 \cdot r_{x,i}$ at every story level, therefore they are characterized as regular in plan.

5 Conclusion

From the presented results obtained from the performed analysis it can be concluded that the choice of method for determining of centre of stiffness and torsional radius in multi-storey structures has a great influence in the further process of designing seismic resistant structures. By increasing of RC wall width the eccentricity of each level is also increasing. Eccentricities at fixed base models are the largest on the first floor. Conversely, at the base isolated models the eccentricities are the largest at the top level and at the first storey are lower as far as 25 times with respect to fixed base models, which is an indicator of the advantages of the base isolated structures in case of irregularity in plan.

References

- [1] CEN: European Standard EN 1998-1: 2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2004.
- [1] Fajfar, P., Marusic, D., Perus, I.: Torsional Effects in the Pushover – Based Seismic Analysis of Buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 9 (2005), pp. 831 – 854.
- [1] IStructE: Manual for the seismic design of steel and concrete buildings to Eurocode_8, The Institution of Structural Engineers, London, 2010.
- [1] OASP: Greek Code for Seismic Resistant Structures – EAK2000, Organization for Earthquake Resistant Planning and Protection, Ministry of Environment Planning and Public Works, Greece (OASP), 2003.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.14>

Promjene dinamičkih svojstava armiranobetonskoga okvira ispitano na potresnom stolu

Adriana Cerovečki, Ivan Kraus

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet
kontakt: acerovecki@gfos.hr

Sažetak

U radu je promatrana armiranobetonska konstrukcija eksperimentalno ispitana na potresnom stolu. Fizički je model konstrukcije ispitano u četiri faze, pri čemu je svaka faza uključivala potres snažnijega intenziteta. To je omogućilo istraživanje utjecaja oštećenja konstrukcije na njezina dinamička svojstva: prigušenje i osnovni period osciliranja. Za promatranu je konstrukciju napravljena procjena prigušenja i osnovnoga perioda osciliranja nakon svake završene faze ispitivanja primjenom vremenskih zapisa pomaka dostupnih autorima. Rezultati dobiveni na stvarnoj konstrukciji uspoređeni su s preporučenim vrijednostima prigušenja te proračunanim vrijednostima osnovnoga perioda osciliranja uz primjenu analitičkih izraza iz dostupne literature. Osim toga, u radu je prikazan i jednostavan način filtriranja i zaglađivanja vremenskih zapisa koji sadrži visoko frekvencijski šum.

Ključne riječi: *eksperiment, prigušenje, osnovni period osciliranja, armiranobetonska konstrukcija*

Changes in dynamic properties of reinforced concrete frame experimentally tested on a shaking table

Abstract

This paper observes reinforced concrete structure experimentally tested on a shaking table. The physical model of the structure was tested in four phases where each phase involved shaking of higher intensity. This allowed study of the influence of structural damage on its dynamic properties. For the observed structure an estimation of the damping and the natural period of oscillation was made after each completed phase of the test using displacement time history records available to the authors. The results obtained from the real structure were compared with the recommended values of damping and calculated values of the fundamental period of oscillation using analytical expressions provided in available literature. Besides that, the paper shows simple way of filtering and smoothing of time histories that comprises high frequency noise.

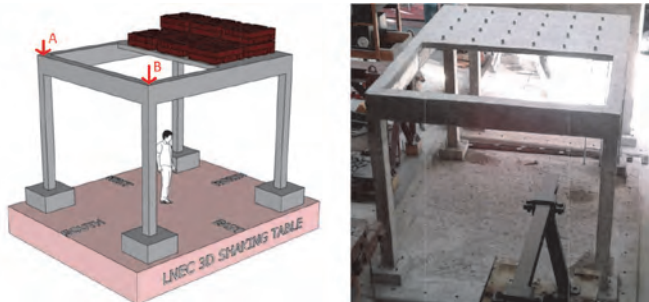
Keywords: *experiment, damping, fundamental period of oscillation, reinforced-concrete structure*

1 Uvod

Ako pogledamo potresnu kartu svijeta, možemo primijetiti da su veliko područje Europe, Kalifornija, Japan, Novi Zeland i mnoga druga područja izrazito potresno aktivna. U tom svjetlu i s ciljem zaštite ljudskih života norme za projektiranje konstrukcija zahtijevaju potresni proračun (npr. [1-4]). Kako bi se takav složeni proračun mogao provesti, treba poznavati ili dobro procijeniti osnovna dinamička svojstva konstrukcije: osnovni period osciliranja te prigušenje. U literaturi (npr. [1-5]) mogu se pronaći izrazi za procjenu osnovnoga perioda osciliranja konstrukcija te preporučene vrijednosti prigušenja konstrukcija. No, dani izrazi za procjenu osnovnoga perioda osciliranja daju vrijednost perioda za elastični (tj. neoštećeni) konstrukcijski sustav, što se također odnosi i na prigušenje. Kako bi se pomoću složenijih, nelinearnih potresnih proračuna u vremenu moglo dobro procijeniti potresni odziv konstrukcije te ju pravilno dimenzionirati s ciljem zaštite ljudskih života u potresno aktivnim područjima, treba moći dobro procijeniti promjene vlastitih perioda osciliranja konstrukcije te prigušenja tijekom djelovanja snažnih podrhtavanja tla. Kako bi se doprinijelo razumijevanju promjene prigušenja te perioda osciliranja konstrukcija u ovom je radu provedena analiza dinamičkoga odziva eksperimentalno ispitane armiranobetonske konstrukcije koja je ispitana na potresnome stolu pri djelovanju dinamičke pobude čiji je intenzitet postupno rastao.

2 Opis eksperimenta

Godine 2012. u sklopu 15. svjetske konferencije o potresnom inženjerstvu u laboratoriju za građevinarstvo u Lisabonu u Portugalu eksperimentalno je ispitana prostorna armiranobetonska konstrukcija. Konstrukcija se sastojala od četiri stupa presjeka 20/20 cm, temelja tlocrtnih dimenzija 50/50 cm i debljine 20 cm, greda 20/40 cm te betonske ploče debljine 10 cm. Konstrukcija je u smjeru sjever-jug (eng. *north-south*) bila duljine 4 m, a u smjeru istok-zapad (eng. *east-west*) 3,5 m. Visina stupova iznosi 3 m. Više informacija o eksperimentu dano je u [6-8]. Konstrukcija je izrađena od betona razreda C 25/30, dok je za armiranje bio upotrijebljen čelik kvalitete S500. Na ploči je postavljeno dodatno stalno opterećenje (slika 1.-lijevo). Stalno je opterećenje dodano u iznosima od 1200 kg i 2400 kg te se prilikom ispitivanja konstrukcije nije mijenjalo.



Slika 1. Trodimenzionalni prikaz modela konstrukcije s nanesenim opterećenjima (lijevo) [6] te prikaz dovršene konstrukcije prije ispitivanja (desno) [8]

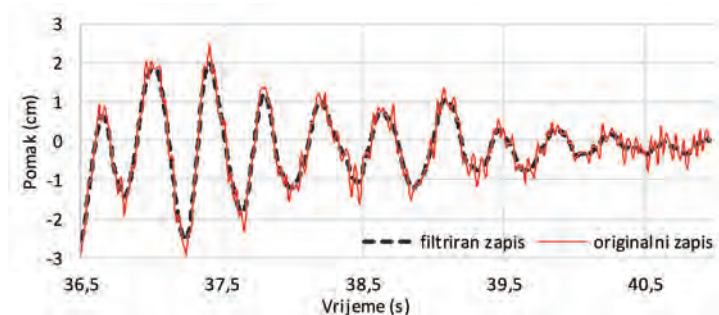
Konstrukcija je istodobno bila pobuđivana u dva horizontalna smjera dinamičkom pobudom koja je simulirala stvarno podrhtavanje tla. Podrhtavanje tla bilo je simulirano u četiri uzastopna koraka, pri čemu je intenzitet podrhtavanja rastao sa svakim korakom: niski intenzitet, srednji intenzitet, referentni intenzitet te, na kraju, visoki intenzitet. Konstrukcija je pobuđena snažnijim intenzitetom podrhtavanja tek nakon što se cijela smirila. Između dva simulirana potresa konstrukcija nije bila sanirana. Rezultat eksperimenta zapisi su pomaka dviju točaka (A i B) za smjer x i y. Točka A bila je smještena na vrhu sjeverozapadnoga stupa, a točka B na vrhu sjeveroistočnog stupa (slika 1.-lijevo). Smjer x predstavlja uzdužni smjer (tj. sjever-jug), dok je smjer y poprečni smjer (tj. istok-zapad).

3 Filtriranje signala

Zapisi pomaka sadržavali su šum visoke frekvencije (slika 2.) te su prije uporabe za procjenu osnovnoga perioda osciliranja i prigušenja filtrirani, tj. očišćeni primjenom jednostavnoga matematičkoga zaglađivanja [5]:

$$S_k = 0,25S_{k-1} + 0,50S_k + 0,25S_{k+1} \quad (1)$$

gdje je S_k vrijednost pomaka u promatranom vremenskom trenutku. Postupak zaglađivanja na svakom je zapisu ponovljen pedeset puta. U literaturi [5] je pokazana primjena ovoga postupka uz ponavljanja i do sto puta.



Slika 2. Primjer originalnoga i filtriranog zapisa pomaka

4 Procjena perioda osciliranja i prigušenja

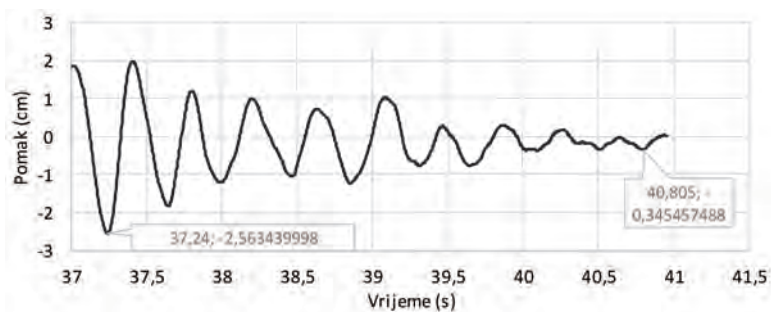
Za određivanje osnovnoga perioda osciliranja konstrukcije te prigušenja upotrebljavaju se slobodni pomaci konstrukcije koji se događaju nakon djelovanja vanjske pobude, tj. pri slobodnim vibracijama [4]. Vremenski zapisi pomaka konstrukcije dostupni autorima nisu sadržavali slobodne vibracije te je ovdje za potrebe istraživanja pretpostavljeno da prilikom smirivanja umjetno induciranoga potresa konstrukcija pseudoslobodno oscilira. Naime, budući da gornji ustroj konstrukcije sadrži veliku masu i da je na takvu masu do približno 39 s djelovala razmjerno velika dinamička pobuda, autori smatraju da konstrukcija pri razmjerno slabom podrhtavanju potresne platforme, tj. nakon 39 s, slobodno prigušeno oscilira. Stoga su dijelovi signala potresnoga zapisa nakon približno 39 s upotrijebljeni za procjenu osnovnoga perioda osciliranja konstrukcije te prigušenja. Prema prijedlogu danom u literaturi [4] primijenjen je izraz (2) za proračun prigušenja konstrukcije, dok je izraz (3) primijenjen za procjenu osnovnoga perioda osciliranja konstrukcije:

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{t_{i+j} - t_i}{j} \quad (3)$$

gdje su j broj valova između promatranih točaka, u_i pomak konstrukcije u prvoj promatranoj točki, a u_{i+j} pomak u drugoj promatranoj točki. Nadalje, t_i se odnosi na vremenski trenutak prve točke, a t_{i+j} druge promatrane točke.

Na primjeru je u nastavku pokazana primjena izraza (2) i (3). Vremenski je zapis pomaka konstrukcije prikazan na slici 3. filtriran, čime je omogućeno lakše očitavanje podataka potrebnih za primjenu u izrazima (2) i (3). Na slici 3. označena su dva trenutka između kojih je uočeno smanjivanje pomaka konstrukcije, te je taj dio bio razmotren u skladu s prethodno opisanom pretpostavkom.



Slika 3. Zapis slobodnih pomaka konstrukcije

Za primjer prikazan na slici 3. dobivene se sljedeće vrijednosti perioda i prigušenja:

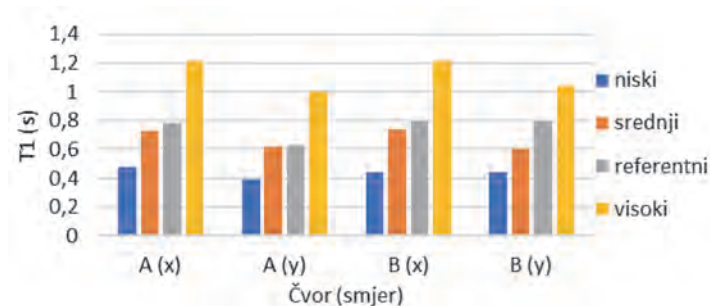
$$T_1 = \frac{40,805 - 37,24}{9} = 0,395s, \quad \xi = \frac{1}{2\pi 9} \ln \frac{2,563}{0,345} = 0,035$$

Ovaj je postupak proveden za oba čvora (A i B) i oba smjera djelovanja potresa te za sva četiri intenziteta podrhtavanja, a rezultati su dani na slikama 4. i 5. Slika 4. sadrži osnovne periode osciliranja konstrukcije, dok slika 5. sadrži prigušenja konstrukcije pri pobudama različitoga intenziteta.

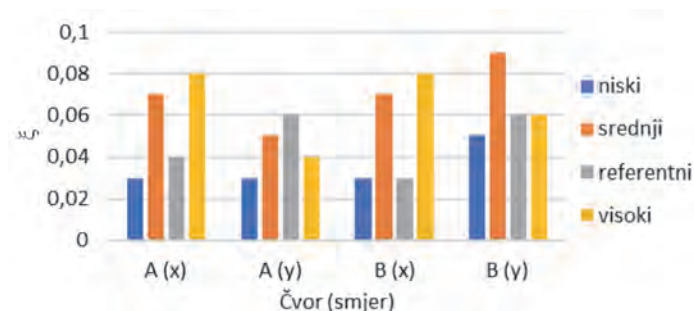
Promatrajući samo fazu ispitivanja koja uključuje podrhtavanje niskoga intenziteta proračunate su srednje vrijednosti osnovnoga perioda osciliranja i prigušenja koje redom iznose $T_1 = 0,425$ s i $\xi = 3,5$ %, što se smatra prikladnim vrijednostima za elastični model konstrukcije. Naime, pri podrhtavanjima razmjerno niskoga intenziteta na konstrukciji se ne javljaju značajna oštećenja, te se vrijednosti osnovnoga perioda osciliranja i prigušenja mogu smatrati odgovarajućima za elastičnu konstrukciju. Budući da autori nisu imali uvid u razinu oštećenja ispitane konstrukcije, ovo je provjereno uz primjenu numeričkih proračuna, o čemu ovdje nije dano više informacija zbog ograničenoga prostora. Nadalje, primjenom izraza (4) [3] za procjenu osnovnoga perioda osciliranja dobiva se iznos od 0,5 s.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \tag{4}$$

gdje je m ukupna masa konstrukcije, a k krutost konstrukcijskih elemenata. U literaturi [4] se kao preporučano prigušenje za armiranobetonke konstrukcije navodi 3-5 %, pri čemu je donja preporučena vrijednost vrlo bliska vrijednosti dobivenoj proračunom.



Slika 4. Osnovni periodi osciliranja T_1 (s) za četiri različita intenziteta potresa



Slika 5. Prigušenje ξ za četiri različita intenziteta potresa

Promatranjem preporučenih vrijednosti u literaturi te vrijednosti dobivenih iz rezultata eksperimenta uočava se dobra podudarnost, osobito kada je riječ o prigušenju. Nadalje, na slici 4. može se uočiti porast osnovnoga perioda osciliranja s porastom intenziteta potresa. To se može objasniti postupnim porastom oštećenja konstrukcije te stvaranjem plastičnih zglobova čija je posljedica porast perioda osciliranja. Gledajući prigušenje (slika 5.), u većini se slučajeva uočava porast s povećanjem intenziteta podrhtavanja, jer oštećena konstrukcija troši više energije zbog trenja koje se javlja unutar plastičnih zglobova. Pojedine vrijednosti prigušenja na slici 5. ne prate trend porasta s porastom intenziteta podrhtavanja, što se dijelom može objasniti pogrešnim ulaznim podacima. Naime, filtriranje zapisa, pa i odabir točaka za proračun perioda i prigušenja, dijelom su uvjetovani subjektivnim odlukama i odabirom. S druge strane, kako je spomenuto i ranije u radu, za procjenu dinamičkih svojstava konstrukcije upotrijebljeni su vremenski zapisi pseudoslobodnih pomaka.

5 Zaključak

Armiranobetonska okvirna konstrukcija ispitana je na potresnom stolu uz primjenu četiri potresa različitih intenziteta. Vremenski zapisi pomaka konstrukcije zaglađeni su primjenom jednostavne metode kako bi se iz njih uklonio šum koji sadrži visoke frekvencije. Pomoću filtriranih zapisa proračunani su period osciliranja i prigušenje nakon svake od četiri faze ispitivanja te je uočen porast vrijednosti oba dinamička svojstva s porastom oštećenja konstrukcije. Oštećena konstrukcija troši više energije prilikom vibriranja što rezultira povećanjem prigušenja, a osnovni period osciliranja se povećava zbog stvaranja plastičnih zglobova. Pojedine vrijednosti prigušenja konstrukcije odstupale su od očekivanih, što je objašnjeno utjecajem odabira točaka za proračun. Dinamička svojstva konstrukcije dobivena analizom vremenskih zapisa najslabijega intenziteta uspoređena su s preporučenim vrijednostima u dostupnoj literaturi te je uočeno njihovo dobro slaganje. Smatra se da prilikom djelovanja zapisa niskog intenziteta konstrukcija ostaje unutar područja elastičnog ponašanja.

Zahvala

Autori se zahvaljuju organizatorima 15. svjetske konferencije o potresnom Inženjerstvu na ustupanju eksperimentalnih rezultata. Autori se također zahvaljuju Građevinskom fakultetu Osijek za financiranje internog znanstveno-istraživačkog projekta PENDULARUM 15-04, u čijem je okviru izrađen ovaj rad.

Literatura

- [1] EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC), 2004.
- [2] Čaušević, M.: Dinamika konstrukcija: potresno inženjerstvo, aerodinamika, konstrukcijske euronorme. Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2010.
- [3] Sigmund, V., Guljaš, I., Stanić, A.: Nelinearni odgovor konstrukcija dimenzioniranih hrvatskim i europskim normama, Građevinar, 54 (2002) 1, pp. 1-13
- [4] Chopra, A.K.: Dynamics of structures, 3. izdanje, Pearson Education, 2007.
- [5] Towhata, I.: 9.12 Spectrum Analysis by Fourier Series, Geotechnical Earthquake Engineering, 1. izdanje, Springer, 2007.
- [6] 15WCEE Blind Test Challenge - Design report, 2012.
- [7] 15WCEE Blind Test Challenge - Preliminary Test report, 2012.
- [8] 15WCEE Blind Test Challenge - Material Data and Construction report, 2012.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.06>

Modeliranje međudjelovanja ljuskastih konstrukcija i tekućine kombinacijom metode konačnih elemenata i čestične metode

Marina Sunara Kusić

FGAG, Sveučilište u Splitu, Hrvatska
kontakt: marina.sunara@gradst.hr

Sažetak

U ovome radu je prikazan numerički model za međudjelovanje konstrukcije i tekućine u uvjetima dinamičkog opterećenja. Model se zasniva na pristupu sa zasebnim rješenjima, pri čemu se za analizu konstrukcije koristi model zasnovan na metodi konačnih elemenata (eng. *Finite element method* - FEM), a za analizu tekućine model zasnovan na metodi hidrodinamike izglađenih čestica (eng. *Smoothed particle hydrodynamics* – SPH). Modelom je moguće opisati glavne nelinearne značajke konstrukcije: tečenje (popuštanje) u tlaku i vlaku i razvoj plastičnosti. Moguće je adekvatno simulirati i osnovne nelinearne karakteristike tekućine: stišljivost, viskoznost i turbulenciju. Numerički testovi provedeni pomoću razvijenog numeričkog modela prikazuju njegovu pouzdanost i mogućnost primjene. Provjera modela izvršena je na primjeru rezultata numeričkih i eksperimentalnih rezultata iz literature.

Ključne riječi: 3D numerički model, interakcija, FSI, FEM, SPH

Modelling fluid and shell structure interaction by combined finite element method and particle method

Abstract

Numerical model for the fluid structure interaction under dynamic loading is presented in this paper. The partitioned approach applied involves the use of the finite element method (FEM) for the analysis of structure, while the smoothed particle hydrodynamics (SPH) is used for the analysis of fluid. The model can be used to describe main nonlinear characteristics of the structure: flow (yield) under compression and tension, and increase in plasticity. It is also possible to simulate basic nonlinear characteristics of the fluid (compressibility, viscous flow, and turbulence). Numerical tests performed using the developed numerical model show its reliability and application. The model is validated using the numerical and experimental results from literature.

Keywords: 3D numerical model, shell model, FSI, FEM, SPH

1 Uvod

Konstrukcije u direktnom kontaktu s tekućinom vrlo su česte u standardnoj inženjerskoj praksi (brane, spremnici, cjevovodi i dr.). Njihovo rušenje može prouzročiti veliku materijalnu štetu i gubitke ljudskih života. Numerički modeli kojima se može realno simulirati ponašanje ovih konstrukcija svakako moraju uključivati i međudjelovanje konstrukcije i tekućine kako bi slika ponašanja ovog kompleksnog sustava bila realna.

Za numeričko rješavanje problema međudjelovanja konstrukcije i tekućine često se primjenjuje metoda konačnih elemenata s tzv. proizvoljnim Lagrange-Eulerovim pristupom (eng. *arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation* - ALE), kao i neke druge metode kojima je osnova metoda konačnih elemenata (eng. *Least Squares Finite Element Method* - LSFEM) [1] i *Particle Finite Element Method* - PFEM [2]). U posljednje se vrijeme za numeričko rješavanje međudjelovanja primjenjuju relativno nove čestične metode (eng. *Smoothed Particle Hydrodynamics* – SPH [3] i *Moving Particle Semi-implicit* – MPS [4]).

Rješavanje problema međudjelovanja izvedenu je prema pristupu sa zasebnim rješenjima (eng. *partitioned approach*), pri čemu se za analizu konstrukcije koristi model zasnovan na metodi konačnih elemenata, a za analizu tekućine model zasnovan na metodi hidrodinamike izgladenih čestica. U nastavku je kratko prikazan razvijeni numerički model [5] i primjeri sa zaključcima.

2 Numerički model

2.1 Model za konstrukciju

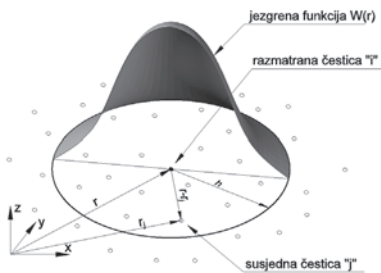
Za analizu konstrukcije koristi se model zasnovan na degeneriranim izoparametrijskim konačnim elementima ljuske. Model korišten u ovom radu je preuzet od Huang [6] i nadopunjen od Radnića i dr. [7]. Mogu se koristiti 8-čvorni ili 9-čvorni elementi s 5 ili 6 stupnjeva slobode u svakom čvoru. Šesti stupanj slobode (rotacijska krutost oko normale na srednju plohu ljuske) dodan je prema Kozuliću [8]. Korišteni model materijala ponajprije je namijenjen modeliranju ljuski od konstrukcijskog čelika, uz pretpostavku elastoplastičnog ponašanja [5]. Moguće je modelirati ljusku koja se sastoji od više slojeva različitog materijala i različitih debljina. Model uzima u obzir geometrijsku nelinearnost za probleme s velikim pomacima, koristeći tzv. ažurirani Lagrangeov postupak [9].

2.2 Model za tekućinu

Za opis gibanja tekućine primjenjuje se metoda hidrodinamike izgladenih čestica (SPH). SPH metodom tekućina se modelira kao skupina pokretnih čestica. Svaka čestica predstavlja dio prostora i sadrži podatke o fizičkim odrednicama tog dijela volumena (masa, gustoća, tlak i sl.). Matematički model metode SPH se temelji na integralnoj interpolaciji nekog svojstva tekućine:

$$A(\vec{r}) = \int_{\Omega} A(\vec{r}') W(\vec{r} - \vec{r}', h) d\vec{r}' \quad (1)$$

gdje je h utjecajna duljina (eng. *smoothing length*), a W je jezgrena (kernel) funkcija [10].



Slika 1. Aproximacija svojstava čestice tekućine unutar utjecajne domene

Dakle, svojstva pojedine čestice dobivaju se težinskim zbrajanjem svojstava okolnih čestica, odnosno onih čestica koje se nalaze unutar prostorne udaljenosti h (slika 1.). Svaka čestica tekućine u svakom vremenskom koraku mora zadovoljiti nekoliko fizikalnih zakona: jednadžbu očuvanja količine gibanja (2), kontinuiteta (3) i očuvanja energije (4):

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (2)$$

$$\rho_a = \sum_b m_b W_{ab} \quad (3)$$

$$\frac{du_a}{dt} = \frac{1}{2} \sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (4)$$

gdje a označava razmatranu česticu, a b susjednu česticu unutar domene h . Tlakovi u tekućini se izračunavaju prema jednadžbi stanja:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (5)$$

gdje je za vodu parametar $\gamma = 7$, $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, a B je parametar brzine zvuka.

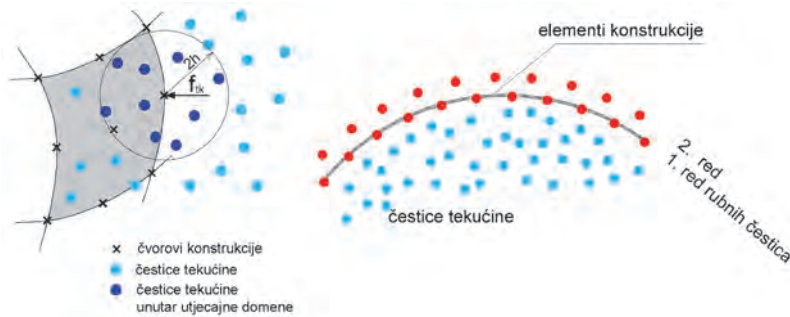
2.3 Model za međudjelovanje

Sile kojima tekućina djeluje na konstrukciju izračunavaju se za svaki čvor konstrukcije prema izrazu:

$$f_{tk} = -QP, Q = \int_{\Gamma_i} N^T \vec{n} N d\Gamma_i \quad (6)$$

gdje je P tlak tekućine, a Q matrica međudjelovanja koja definira plohu međudjelovanja, N su bazne funkcije, a \vec{n} je vanjska normala na konstrukciju (ljsku) na plohi međudjelovanja. Sile f_{tk} predstavljaju dio efektivnog vektora opterećenja na konstrukciju, čiji se nepoznati čvorni pomaci proračunavaju metodom konačnih elemenata.

Nakon proračuna nepoznatih pomaka konstrukcije, virtualne rubne čestice na plohi međudjelovanja mijenjaju svoj položaj u skladu s izračunanim pomacima konstrukcije, čime se mijenjaju rubni uvjeti tekućine (slika 2.). Zatim slijedi analiza tekućine i proračun tlakova metodom hidrodinamike izgladenih čestica. Ovaj postupak se ponavlja za svaki vremenski korak analize, do isteka ukupnog vremena proračuna.



Slika 2. Ploha međudjelovanja konstrukcije i tekućine

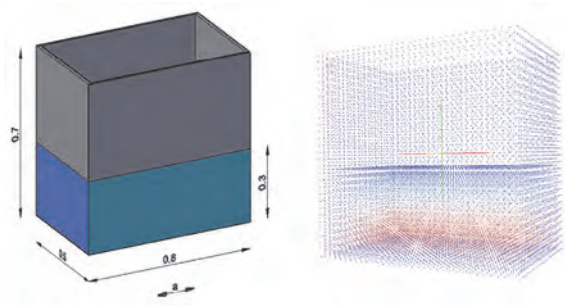
3 Numerički model

Pomoću prethodno prikazanog numeričkog modela za međudjelovanje konstrukcije i tekućine provedena je analiza zapljuskivanja vode u spremnicima s krutim i deformabilnim stranicama prema primjerima iz literature [4]. Spremnici su izloženi harmonijskom ubrzanju podloge prema:

$$a = a_0 \sin \omega t \quad (7)$$

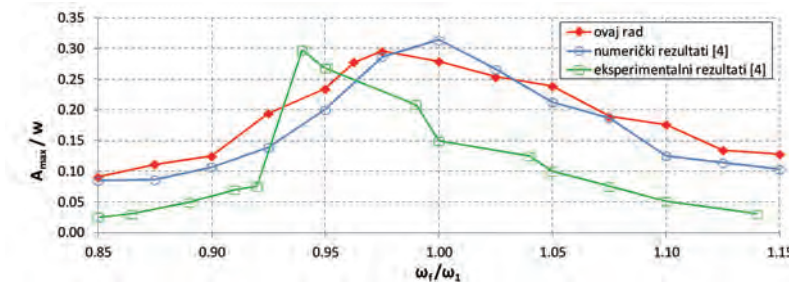
3.1 Zapljuskivanje u spremniku s krutim stranicama

Spremnik dimenzija 0,8 m x 0,5 m x 0,7 m napunjen je vodom do 0,3 m i izložen harmonijskom ubrzanju podloge s amplitudom $a_0 = 0,05$ g prema izrazu (7) (slika 3.). Teorijska rezonantna frekvencija osciliranja vode u spremniku iznosi $\omega_1 = 0,89$ Hz [11].



Slika 3. Geometrija spremnika s krutim stranicama i početni razmak čestica

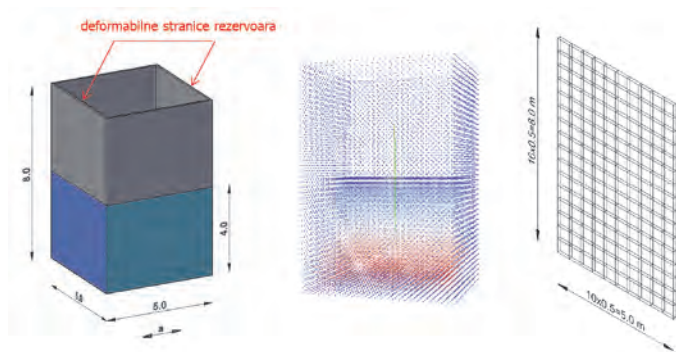
Najveće uzdizanje vode na desnoj stranici spremnika A_{max} u odnosu na početnu razinu vode i duljinu spremnika w (0,8 m) prikazano je na slici 4. Rezultati analiza su uspoređeni s rezultatima 2D numeričkog modela i eksperimentalnim rezultatima iz literature [4]. Maksimalno uzdizanje vode u spremniku A_{max} dobiveno je za pobudu s frekvencijom nešto manjom od teorijski rezonantne frekvencije (za $\omega_f = 0,975\omega_1$).



Slika 4. Rezonantni odgovor spremnika s krutim stranicama

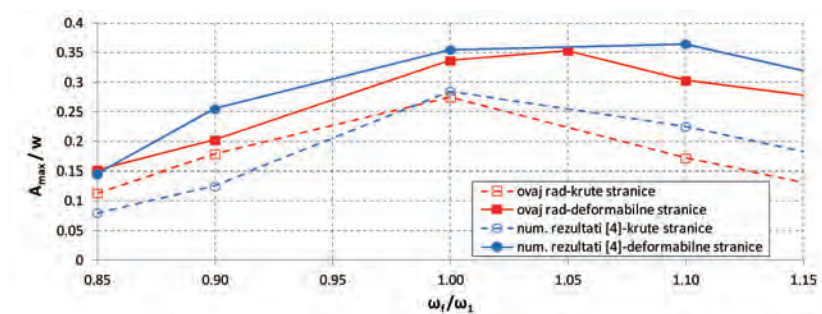
3.2 Zapljuskivanje u spremniku s deformabilnim stranicama

Spremnik dimenzija 5,0 m x 5,0 m x 8,0 m napunjen je vodom do 4,0 m i izložen harmonijskom ubrzanju podloge s amplitudom $a_0 = 0,05$ g prema izrazu (7) (slika 5.). Voda je modelirana s oko 6000 čestica (početni razmak 0,2 m), a deformabilne stranice spremnika sa 320 konačnih elemenata. Deformabilne stranice su debljine $t = 0,11034$ m, od materijala s modulom elastičnosti $E = 5$ GPa, Poissonovim koeficijentom $\nu = 0,3$ i gustoćom $\rho = 7860$ kg/m³. Teorijska rezonantna frekvencija osciliranja vode u spremniku iznosi $\omega_1 = 0,39$ Hz [11].



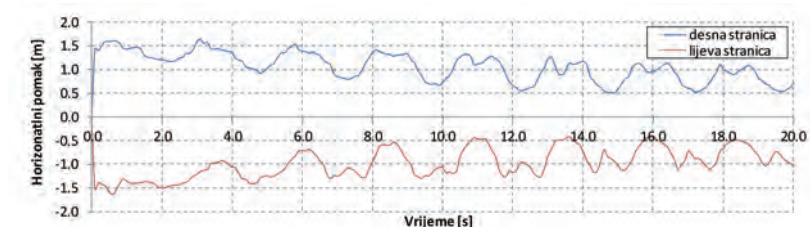
Slika 5. Geometrija spremnika s deformabilnim stranicama i diskretizacija

Najveće uzdizanje vode na desnoj stranici spremnika A_{max} u odnosu na početnu razinu vode i duljinu spremnika w (5,0 m) prikazano je na slici 6. Rezultati analiza su uspoređeni s rezultatima 2D numeričkog modela iz literature [4]. Može se uočiti vrlo dobro podudaranje rezultata u oba slučaja (krute/deformabilne stranice).

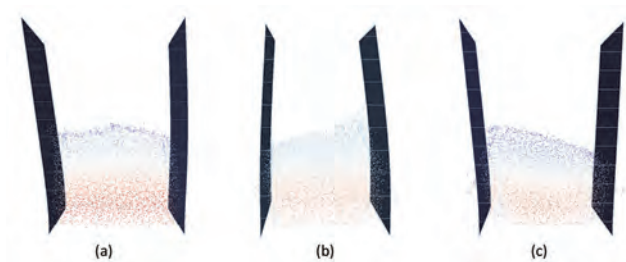


Slika 6. Rezonantni odgovor spremnika s deformabilnim stranicama

Na slici 7. prikazani su pomaci vrha deformabilne konstrukcije u vremenu, a na slici 8.b je prikazan spremnik u trenutku neposredno prije (slika 8.a) i neposredno poslije (slika 8.c) maksimalnog uzdizanja vode na desnoj stranici spremnika.



Slika 7. Pomaci vrha ljsuke u vremenu



Slika 8. Rezonantni odgovor spremnika s deformabilnim stranicama

4 Zaključak

U radu je prikazan numerički model za međudjelovanje ljuskastih konstrukcija i tekućine temeljen na metodama FEM i SPH. Iz priloženih primjera je vidljivo da se pomoću razvijenog numeričkog modela može realno simulirati ponašanje vode u spremniku s krutim i deformabilnim stranicama tijekom rezonantnih i nerezonantnih pobuda.

Literatura

- [1] Kayser-Herold, O., Matthies, H.: A unified least-squares formulation for fluid-structure interaction problems, *Comput Struct*, 85 (2007), pp. 998-1011.
- [2] Zhu, M., Scott, M.H.: Modeling fluid-structure interaction by the particle finite element method in OpenSees. *Comput Struct*, 132 (2014), pp. 12–21.
- [1] Yang, Q., Jones, V., McCue, L.: Free-surface flow interactions with deformable structures using an SPH–FEM model, *Ocean Eng*, 55 (2012), pp. 136-147.
- [3] Lee, C.J.K., Noguchi, H., Koshizuka, S.: Fluid–shell structure interaction analysis by coupled particle and finite element method, *Comput Struct*, 85 (2007), pp. 688–697.
- [4] Sunara Kusić, M.: Numeričko modeliranje međudjelovanja konstrukcije i tekućine kombinacijom metode konačnih elemenata i hidrodinamike izgladenih čestica, Doktorski rad, FGAG Sveučilišta u Splitu, Split, 2017.
- [5] Huang, H.C.: *Static and Dynamic Analysis of Plates and Shells*, Springer-Verlag, 1989.
- [6] Radnić, J., Harapin, A., Matešan, D.: Geometrical nonlinearity model in static analysis of shells, *Građevinar*, 55 (2003) 10, pp. 583-589.
- [7] Kozulić, V.: Numerička analiza konstrukcija sastavljenih od ljuski i stupova, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 1993.
- [8] Nagtegaal, J.C., De Jong, J.E.: Some Computational Aspects of Elasto-plastic Large Strain Analysis, *Int J Numer Meth Eng*, 17 (1981), pp. 15-41.

- [9] Gingold, R.A., Monaghan, J.J.: Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Mon Not R Astron Soc*, 181 (1977), pp. 375-389.
- [10] Ibrahim, R.A.: *Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications*, Cambridge University Press, 2000.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Arhitektura

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.07>

Korisničko vrednovanje prostornih karakteristika stana

Ivana Brkanić¹, Jelena Atanacković-Jeličić², Radivoje Dinulović²

¹ Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek

² Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

kontakt:

Sažetak

Stan je primarno mjesto čovjekova bivanja, a kvaliteta stanovanja jedan od najvećih interesa društva. Dosadašnjim istraživanjem stanovanja u višestambenim zgradama, uočen je nerazmjer između karakteristika, odnosno kvalitete sadašnjeg stambenog fonda i potreba korisnika, što govori o nužnosti za detaljnim i kontinuiranim istraživanjem teme stanovanja upravo iz ovog aspekta. Potrebi za istraživanjem pridonose i stalne promjene stambenih potreba koje uvjetuje suvremeni način života. Cilj je ovog rada dati uvid u istraživanje koje se provodi u sklopu disertacije čija je tema razvoj modela korisničkog vrednovanja prostornih karakteristika stana. Istraživanje koje se provodi usmjereno je na analizu arhitektonskog rješenja stana s težnjom da se prouči njegova pogodnost da unutar svojih granica korisniku osigura adekvatan prostor za suvremeni način života. Uspostavljanjem relacije između teorijskih i praktičnih iskustava, odnosno iskustava istraživača i projekatanata s iskustvom korisnika stana, teži se kvalitetnom i sveobuhvatnom pristupu projektiranja čovjekove najintimnije sredine.

Ključne riječi: stan, vrednovanje, kvaliteta stanovanja, korisnik, prostorne karakteristike stana

User evaluation of spatial properties of apartments

Abstract

The apartment is regarded as a person's primary place of residence, and housing quality as one of the greatest interests of the society. During analysis of previous studies on collective housing, a discrepancy has been revealed between the characteristics, i.e. the quality, of the current housing stock and the needs of apartment users. This discrepancy points to the need for a detailed and continuous research of the housing issue from this specific point of view. Continuous changes in housing needs, made necessary by modern lifestyle, have also contributed to the need for this research. The aim of this paper is to provide an insight into the research that is carried out within a PhD dissertation focusing on the development of a model for user evaluation of spatial characteristics of apartments. The research that is currently under way concentrates on the analysis of an architectural solution for apartments in order to examine suitability of apartments to provide users, within appropriate limits, with an adequate space ensuring a modern lifestyle. This research aims to provide a qualitative and comprehensive approach to apartment design, where apartment is regarded as every person's most intimated space, and this through establishment of the relationship between theoretical and practical experience, i.e. between the experience of researchers and designers and that of apartment users.

Keywords: apartment, evaluation, housing quality, user, apartment's spatial characteristics

1 Uvod

Stan predstavlja prvu jedinicu društva [1], primarna je jedinica stanovanja, ali i ljudska osnovna potreba [2]. Najveća je materijalna [3] i simbolična vrijednost svakog kućanstva, te na određen način predstavlja statusni simbol [4]. Stambeni fond je i važan dio nacionalnog bogatstva [5]. Stan definira fizičku i psihološku ljusku obitelji, životni prostor u kojemu čovjek obnavlja svoje fizičke i psihičke snage te predstavlja mjesto socijalne jednakosti i individualnog oslobođenja [6]. Drugim riječima, možemo ga definirati kao određenu količinu materijalnog omotača za određeni broj ljudi [6] i određenu količinu njihovih potreba. Mjesto je gdje čovjek nalazi sklonište, gdje se socijalizira, obrazuje i priprema za život odraslih. Stan, ako ga promatramo kroz njegovu materijalizaciju - arhitekturu, prisutan je u svim fazama ljudskog razvoja i života [2]. Kvalitativni aspekti stanovanja dobili su na važnosti u posljednjih nekoliko godina jer su korisnici sve više svjesni problema kvalitete u stambenim okruženjima, no ne postoji puno platformi ili jednoobrazno definiranih kriterija uz pomoć kojih bi profesionalci i krajnji korisnici mogli mjeriti kvalitetu stana [7]. Također, uočen je i nerazmjer između karakteristika odnosno kvalitete sadašnjeg stambenog fonda i potreba korisnika, što govori o nužnosti za detaljnim i kontinuiranim istraživanjem teme stanovanja iz ovog aspekta. Potrebi za istraživanjem pridonose i stalne promjene stambenih potreba koje uvjetuje suvremeni način života. Cilj je ovog rada dati uvid u istraživanje koje se provodi u sklopu disertacije čija je tema razvoj modela korisničkog vrednovanja prostornih karakteristika stana.

2 Znanstveni problem i potreba za istraživanjem

Stambena arhitektura je arhitektura najbliža korisniku, njezine karakteristike izravno utječu na kvalitetu i način njegova života. Prilikom detaljnog pregleda literature vezanog uz temu kvalitete stanovanja, uočena je potreba za radom koji će svojim rezultatima pridonijeti identifikaciji poželjnih prostornih karakteristika stana iz korisničke sfere. Kroz razumijevanje potreba korisnika i njihovim uvrštavanjem u proces projektiranja novih i obnove postojećih stambenih zgrada označio bi se pomak u dosadašnjoj projektantskoj praksi. Primjenom rezultata ovakvih istraživanja unaprijedila bi se kvaliteta stanovanja, a samim time i povećalo korisnikovo zadovoljstvo stanovanjem. U dosadašnjim istraživanjima kvaliteta stanovanja je definirana kroz razinu zadovoljstva korisnika [3, 8-12]. Tibesigwa i suradnici kvalitetu stanovanja shvaćaju kao skup različitih čimbenika koji uključuju fizičko stanje stambenog objekta i blizinu usluga u njegovoj okolini [13]. Tvrde kako bi kvalitetno stanovanje trebalo zadovoljiti minimalne higijenske potrebe i dobar životni standard. Prema njima, ocjena kvalitete stanovanja uključuje karakteristike korisnika te karakteristike i performanse prostora [13]. Može se reći i to da kvaliteta stanovanja znači razliku između korisnikove stambene

stvarnosti i njegovih očekivanja [14]. Upravo su ove teorijske postavke temelj na kojemu se zasniva doktorski rad.

Veći dio istraživačke i zakonodavne pozornosti struke u Hrvatskoj usmjeren je na novogradnju, dok se problemi i važnost postojeće izgradnje zanemaruju [15]. Još jedan od razloga za proučavanjem postojećeg fonda višestambenih zgrada jesu i podaci kako se u Hrvatskoj godišnje izgradi oko 1 % novih stambenih zgrada i kako većina stanovnika živi u stambenim zgradama od kojih je više od 60 % izgrađeno prije 1980. godine [16]. Potrebno je procijeniti sadašnje stanje stambenog fonda gradova kako bi se utvrdila njegova kvaliteta i pogodnost za zadovoljavanje stambenih potreba korisnika.

U okviru disertacije istražuje se stanovanje u višestambenim zgradama, a problemu kvalitete stanovanja u stanu, odnosno ocjeni kvalitete njegovih prostornih karakteristika, pristupilo se iz perspektive njegovih korisnika. Ovakav pristup odabran je zbog toga što vizija kvalitetnog stana iz perspektive arhitekta - projektanta ne mora nužno biti ista kao i ona njegovih korisnika - stanara. Ovaj je pristup odabran i zato što se višestambene zgrade najčešće grade za nepoznatog korisnika [15]. Ocjena stana iz perspektive korisnika otkriva njihove potrebe i želje, što u konačnici dovodi do definiranja poželjnih prostornih karakteristika stana koje se mogu upotrijebiti u vrednovanju postojećeg stambenog fonda i primijeniti kod adaptacija, ali i kod projektiranja novih višestambenih zgrada.

Istraživanje koje se provodi u sklopu disertacije usmjereno je na analizu arhitektonskog rješenja stana, s težnjom da se prouči njegova pogodnost da unutar svojih granica osigura okvir za suvremeni način života. Disertacija je usmjerena prema definiranju modela za korisničko vrednovanje prostornih karakteristika stana. Razvoju modela se pristupilo analizom dostupne literature iz promatranog područja i ispitivanjem stavova stručnjaka i korisnika. Konkretni predmet istraživanja se ispituje, a njegovi rezultati bit će prikazani na primjeru grada Osijeka, na višestambenim zgradama nastalim u periodu između 1930. i 2015. godine.

3 Cilj istraživanja

Istraživanje koje će se prikazati u okviru disertacije provodi se s namjerom da se analizira sadašnji osječki fond višestambenih zgrada. Glavni cilj disertacije jest iz perspektive korisnika, na temelju predloženog modela odrediti ocjenu prostornih karakteristika stanova u gradu Osijeku. U radu se pitanje zadovoljstva korisnika i kvalitete života postavlja u kontekstu arhitekture s ciljem razmatranja najvažnijih prostornih karakteristika stana koje na njih utječu. Opći cilj istraživanja je argumentiranje i tumačenje fenomena kvalitete stana iz perspektive korisnika.

Na temelju prije definiranog znanstvenog problema i potrebe za istraživanjem, a zbog jasnijeg afirmiranja istraživačkog procesa, preciznije su definirani i sljedeći specifični ciljevi istraživanja:

- prikazati kvantitativan pregled kvalitete stambenog fonda grada Osijeka za period između 1930. i 2015. godine
- prikazati povijesni razvoj stana te karakteristične sheme prostorne organizacije stanova u Osijeku za razdoblje od 1930. do 2015. godine
- utvrditi listu preferencija prostornih karakteristika stana i listu težinskih faktora za pojedine prostorne kriterije - pokazatelje kvalitete stana sa stajališta korisnika-stanara
- razviti model korisničkog vrednovanja prostornih karakteristika stana
- temeljem razvijenog modela vrednovati odabrane stanove.

4 Metodologija

Istraživanje je započelo s prikupljanjem arhivske građe - glavnih i izvedbenih projekata stambenih zgrada, koja je bila dostupna u Hrvatskom državnom arhivu u Osijeku i koju su na korištenje ustupili projektantski biro i izvođačke tvrtke na području grada Osijeka. Također, prikupljeni su i analizirani izvori domaće i strane literature unutar kojih je obrađena problematika kolektivnog stanovanja, zadovoljstvo stanovanjem, ocjena kvalitete stambenog prostora te zakonodavni okvir i smjernice za projektiranje višestambenih zgrada.

U okviru istraživačkog rada, zbog složenog predmeta istraživanja, primjenjuje se nekoliko znanstvenih metoda istraživanja. Znanstvene metode analize i sinteze koristit će se prilikom cijelog istraživanja: prilikom rada na pregledu literature, prikupljanja te obrade projektne dokumentacije te naknadne selekcije karakterističnih tlocrta stanova, odabira karakteristika stana koje će poslužiti kao kriterij ocjenjivanja stanova, analize rezultata anketiranja pa sve do izvođenja zaključaka. Komparativna metoda primijenjena je pri odabiru karakterističnih tlocrta stanova te za odabir kriterija na temelju kojih su u literaturi ocjenjivani zadovoljstvo i kvaliteta stanovanja. Povijesnu metodu potrebno je izdvojiti kao jednu od metoda na temelju koje je proveden i prikazan pregled literature, a uz pomoć te metode definirao se i povijesni pregled razvoja stana.

Formiranju modela pristupilo se tako da su najprije na temelju literature utvrđeni kriteriji za ocjenjivanje prostorne kvalitete stana. Za konačno utvrđivanje kriterija prostorne kvalitete stana, kojima se koristi u nastavku istraživanja, provedeni su intervjui sa stručnjacima. Stručnjaci su ispitani na osnovi vođenog intervjua kako bi se odredili kriteriji temeljem kojih se formirao upitnik za ispitivanje stavova stanovnika – korisnika stanova. Proveden je intervju s 14 ispitanika koji su stručnjaci u području projektiranja stambenih zgrada, znanstvenici te osobe koje djeluju u oba područja. Rezultati intervjua poslužili su za izradu testnog upitnika. Uzorak za testni upitnik bio je 130 ispitanika. Nakon što se analizom rezultata testnog upitnika i komentara ispitanika utvrdila razumljivost i prilagođenost pitanja različitim grupama ispitanika, pristupilo se anketiranju korisnika stanova - stanovnika grada Osijeka. Anketiranje je provedeno

na javnim prostorima naselja višestambenih zgrada, na uzorku od 400 ispitanika. Rezultati anketnog upitnika statistički su obrađeni pomoću računalnog paketa SPSS. Na temelju rezultata ankete bit će obavljeno dodjeljivanje težinskih faktora svakoj prostornoj karakteristici stana. Nakon definiranja težinskih faktora odabranih prostornih karakteristika stana, krenut će se u ocjenjivanje prostorne kvalitete odabranih stanova na temelju njihovih tlocrtnih rješenja.

Rezultati istraživanja bit će predstavljeni grafičkim (karte, tablice, tlocrti, sheme i dijagrami) te pisanim načinom. Sistematizacijom svih podataka i dobivenih rezultata na kraju istraživanja će se formirati zaključci te predložiti smjer za buduća istraživanja.

5 Rezultati koji se očekuju

Očekivani rezultati koje će disertacija dati arhitektonskoj teoriji i praksi su:

- pregled kvantitativnih pokazatelja kvalitete fonda višestambenih zgrada u Osijeku za period od 1930. do 2015. godine
- katalog karakterističnih shema prostorne organizacije i tlocrta stanova
- pregled korisničkih preferencija prostornih karakteristika stana
- model koji budući korisnici – stanari stana mogu koristiti prilikom usporedbe i ocjene niza stanova u svrhu konačnog odabira stana
- ocjena kvalitete stanova na području grada Osijeka iz perspektive korisnika.

6 Zaključak

Potrebe korisnika su središnje pitanje stanovanja, a kako su one po svom karakteru promjenjive, tako je i ovu temu potrebno kontinuirano istraživati i preispitivati prethodno utvrđene postavke. Ovim se istraživanjem želi upozoriti na potrebu uključivanja korisnika u proces izrade potrebnih smjernica za projektiranje višestambenih zgrada, što ujedno znači i njegovo direktno uključivanje u proces projektiranja takvih zgrada. Rezultati istraživanja će svoj doprinos dati daljnjem razvoju teorije i prakse u području višestambenih zgrada. Zbog uključenosti korisničkih stavova, njihovih potreba i želja, rezultati istraživanja mogu poslužiti kao ulaznica razvoju smjernica za projektiranje koje će u budućnosti koristiti za projektiranje novih ili adaptaciju postojećih stambenih zgrada u svrhu osiguranja veće kvalitete stana. Katalog stanova, kvantitativni pokazatelji kvalitete fonda višestambenih zgrada u gradu Osijeku te liste poželjnih prostornih karakteristika stana iz korisničke perspektive moći će poslužiti kao početne točke novih istraživačkih procesa.

Multidisciplinarni karakter teme istraživanja osigurava mogućnost primjene rezultata istraživanja ne samo u području arhitekture već i drugim disciplinama: sociologiji, ekonomiji, psihologiji, geografiji... Rezultat istraživanja, odnosno njegov konačni ishod

- model korisničkog vrednovanja prostornih karakteristika stana - može uz određene prilagodbe koristiti kao praktični alat projektantima, investitorima te izvođačima prilikom vrednovanja stana. Uspostavljanjem relacije između teorijskih i praktičnih iskustva, odnosno iskustva istraživača i projektanata i korisnika-stanara, teži se drugačijem, kvalitetnom i sveobuhvatnom pristupu projektiranja čovjekove najintimnije sredine.

Literatura

- [1] Kurian, S.M., Thampuran, A.: Assessment of Housing Quality, Institute of Town Planners, India Journal, 8 (2001) 2, pp. 74-85.
- [2] Nur dini, A., Belgawan Harun, I.: Spatial Bounded-Choice Behaviour within the Consumer of Rental Housing in Bandung, Indonesia, Journal of Asian Behavioural Studies, 2 (2012) 4, pp. 58-68, DOI:10.1016/j.sbspro.2012.03.021
- [3] Lu, M.: Determinants of Residential Satisfaction: Ordered Logit vs. Regression Models, Growth and Change, 30 (1999), pp. 264-287, DOI: 10.1111/0017-4815.00113
- [4] Nahtigal, D., Grum, B.: Segmentation and the Value Frame of Buyers of Residential Apartments, Geodetski vestnik, 59 (2015) 1, pp. 71-101, DOI:10.15292/geodetski-vestnik.2015.01.071-101
- [5] Bežovan, G.: Stambena statistika – standard stanovanja u Hrvatskoj, Revija socijalne politike, 11 (2004) 2, pp. 267-279, DOI: 10.3935/rsp.v11i2.63
- [6] Biondić, Lj.: Stan kao pravo na mjesto, Prostor, 6 (1998) 1-2, pp. 25-34.
- [7] Chohan, A.H. et al.: A Model of Housing Quality Determinants (HQD) for Affordable Housing, Journal of Construction in Developing Countries, 20 (2015) 1, pp. 117–136.
- [8] Elsinga, M., Hoekstra, J.: Homeownership and housing satisfaction, Journal of Housing and the Built Environment, 20 (2005), pp.401-424, DOI: 10.1007/s10901-005-9023-4
- [9] Amole, D.: Residential satisfaction in students' housing, Journal of Environmental Psychology, 29 (2009), pp. 76-85, DOI: 10.1016/j.jenvp.2008.05.006
- [10] James, R.N. III: Multifamily housing characteristics and tenant satisfaction, Journal of Performance of Constructed Facilities, 21 (2007), pp. 472-480, DOI:0.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:6(472)
- [11] Grum, B.; Kobal Grum, D.: Satisfaction with current residence status in comparison with expectations of real estate buyers in Slovenia and Serbia, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 109 (2014), pp. 263-275, DOI:10.1016/j.sbspro.2013.12.456
- [12] Bennett, J. et al.:Towards an agreed quality standard for rental housing: Field testing of a

New Zealand housing WOF tool, Australian and New Zealand Journal of Public Health, pp. 1-7, 2016, DOI: 10.1111/1753-6405.12519

- [13] Tibesigwa, B.M., Hao, L., Karumuna, B.V.: The Concept of Spatial Quality and its Challenges on Exercised Affordable Housing Design Typology in Dar es Salaam – Tanzania, Habitat International, 59 (2017), pp. 44-59, DOI: 10.1016/j.habitatint.2016.11.010
- [14] Huang, Z., Du, X.: Assessment and determinants of residential satisfaction with public housing in Hangzhou, China, Habitat International, 47 (2015), pp. 218-230, DOI:10.1016/j.habitatint.2015.01.025
- [15] Vezilić Strmo, N., Senjak, I., Štulhofer, A.: Održivost postojeće stambene izgradnje i mogućnosti procjene, Prostor, 22 (2014) 1, pp. 122-133
- [16] Statističke informacije 2016, (www.dzs.hr), pristupljeno: 25.02.2017.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.12>

Stambene politike i primjeri socijalnog stanovanja u Europskoj uniji

Marinko Sladoljev

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
kontakt: mssladoljev@grad.hr

Sažetak

Ukratko se opisuju stambene politike Europske unije na osnovi dokumenata i institucija Europske unije s osvrtom na socijalno stanovanje. Značajan dokument na temu stanovanja je Europska stambena povelja koja definira stanovanje kao nužno dobro i temeljno socijalno pravo. Europska stambena povelja naglašava socijalnu osviještenost Unije i ustrajnost u borbi protiv diskriminacije i beskućništva, bez obzira na rasu, naciju, vjeru ili novčane prihode. Kvalitetno stanovanje jedan je od uvjeta održivog razvoja Europske unije. Važnu ulogu u postizanju navedenih ciljeva ima socijalno stanovanje. To je oblik stambenog zakupa u kojem se nekretnina nalazi u vlasništvu države, grada ili općine, ali može se odnositi i na prodaju po posebnim uvjetima stanova čija je izgradnja financirana od strane države, neprofitnih organizacija ili privatnog investitora. Europske zemlje nemaju zajedničku socijalnu stambenu politiku pa su prisutni različiti modeli. U ovom radu prikazana su tri modela država iz sjeverne Europe s tradicijom socijalne politike, jakim zakonodavstvom i visokog općeg blagostanja.

Ključne riječi: stambene politike, Europska stambena povelja, socijalno stanovanje

Housing policy and examples of social housing in the European Union

Abstract

The article briefly describes housing policies of the European Union through documents and institutions of the European Union with reference to social housing. A significant document on housing is the European Charter for Housing which defines housing as a necessary good and a fundamental social right. The Charter emphasizes the European Union's social awareness and perseverance in the fight against discrimination and homelessness, regardless of race, nation, religion or monetary income. Quality housing is one of the conditions for the sustainable development of the European Union. An important role in achieving these goals is social housing. This is a form of housing lease in which property is owned by the state, city or municipality, but the term may also relate to the sale under special conditions in the case of housing estates whose construction is financed by the state, non-profit organizations or private investors. European countries do not have a common social housing policy, so different models are present. This article presents three models implemented in the countries of northern Europe with the tradition of social policy, strong legislation and high general prosperity.

Keywords: housing policy, European charter for housing, social housing

1 Uvod

Kvalitetno, odnosno prikladno stanovanje ima iznimno važnu ulogu u gospodarskom, socijalnom i ekološkom, jednom riječju, održivom razvoju Europske unije (EU). Europska unija stambenom politikom, strategijama, poveljama i institucijama pridonosi socijalnoj, urbanoj i teritorijalnoj koheziji svih zemalja članica, a stambeno pitanje predstavlja važno mjesto urbanog razvoja i okvir kohezijske politike Europe.

2 Stambene politike i dokumenti u Europskoj uniji

Parlamentarna skupina URBAN Intergroup (prije poznata kao URBAN-Housing) Europskog parlamenta koja se bavi pitanjem stanovanja u Europskoj uniji, usvojila je u travnju 2006. Europsku stambenu povelju. Europskoj stambenoj povelji prethodili su važni međunarodni i europski dokumenti na temelju kojih je donesena, a istaknut ćemo:

- Opću deklaraciju o ljudskim pravima Ujedinjenih naroda iz 1948. koja naglašava u čl. 25 da svako ljudsko biće ima pravo na pristojan život, uključujući primjerenu hranu, odjeću, stan, liječničku njegu ili potrebne socijalne usluge [1]
- Socijalnu povelju Vijeća Europe iz 1999. koja u čl.31 govori o pravu na stanovanje koje mora biti odgovarajućeg standarda, potrebi preveniranja i iskorjenjivanja beskućništva te nužnosti priuštivosti stanovanja onima bez odgovarajućih prihoda [2]
- Zaključak Europskog vijeća u Nici iz prosinca 2000. o važnosti stanovanja u socijalnoj koheziji Europe [3].

Povelja Europske unije o temeljnim pravima iz prosinca 2007. g., čl.34, stavak 3 kaže: S ciljem borbe protiv socijalne isključenosti i siromaštva, Unija priznaje i poštuje pravo na socijalnu pomoć i pomoć u vezi sa stanovanjem kako bi se osigurao dostojan život svima koji nemaju dovoljno sredstava, u skladu s pravilima utvrđenima pravom Unije te nacionalnim zakonodavstvima i praksom [4].

Prvo poglavlje prije spomenute Europske stambene povelje (ESP) iz 2006. definira stanovanje kao nužno dobro i temeljno socijalno pravo, element ljudskog dostojanstva, sastavnicu socijalnog uključivanja i faktor socijalne kohezije članica Europske unije. Svaki građanin EU ima pravo na zdrav, pristojan i priuštiv stan, iznajmljeni ili u vlasništvu. Istovremeno, EU se obvezuje poduzeti ciljne mjere protiv diskriminacije, deložacije, trajnih oblika substandardnog stanovanja i beskućništva.

Pristup stanu osnovni je korak u borbi protiv siromaštva, uvjet za socijalnu integraciju, sudjelovanje u društvenom životu, zapošljavanje, mobilnost i kvalitetu života. Stambeni sektor, stambena izgradnja isto je tako važan izvor zapošljavanja, a adaptacija postojećeg stambenog fonda veliki potencijalni izvori ekonomskog razvoja tržišta.

U članku 11 naglašava se važnost standardiziranja usluga i pojmova koji se odnose na

stanovanje, primjenu i kontrolu provedbe tih mjera na području svih članica EU [5].

Na web-stranici parlamentarne skupine URBAN Intergroup stoji:

Više od 70 % europske populacije živi u urbanim područjima. Gradovi se sve više vide kao pokretači nacionalne i regionalne ekonomije; ipak, u isto vrijeme mnogi problemi društvene i ekološke prirode leže u urbanim područjima.

Prema supsidijarnom principu, urbana politika nije u nadležnosti EU (*već u nacionalnoj, regionalnoj i lokalnoj nadležnosti, op.a.*). Ipak, oko tri četvrtine EU legislative implementirano je u lokalne i regionalne razine i ima direktan utjecaj na europske gradove [6].

Ako spominjemo važnije europske dokumente iz područja održivog razvoja vezanog uz stanovanje, svakako treba spomenuti i Leipzišku povelju iz 2007. Leipziška povelja o europskim gradovima usko je vezana na područje urbanizma i govori o održivom razvoju gradova, gospodarskom prosperitetu, socijalnoj ravnoteži i zdravom okolišu.

Nadalje, gradovi su područja velikih gospodarskih i socijalnih promjena, pa se specifični problemi poput nezaposlenosti i socijalnih isključenja upravo tu događaju. Stoga Leipziška povelja napominje da dobro osmišljene socijalne stambene politike mogu biti učinkoviti alati postizanja ciljeva socijalne kohezije i integracije u gradovima.

Kao unapređenje prostornog okoliša vide se ulaganja i gospodarska aktivnost na nivou zapostavljenog postojećeg stambenog fonda.

U povelji se ističe i važan doprinos zapošljavanju prilikom gradnje, renoviranja i obnove stanova. Zaključak je da su Europi potrebni snažni gradovi i regije u kojima se dobro živi [7]. U travnju 2017. Europska komisija predstavila je prijedlog dokumenta - Europski stup socijalnih prava. Naglašava se prioritet u izgradnji pravednije Europe i jačanje njene socijalne dimenzije. U okviru Europskog stupa socijalnih prava utvrđeno je 20 ključnih načela i prava kojima će se podupirati pravedna tržišta rada i sustavi socijalne skrbi i njihovo dobro funkcioniranje radi stvaranja boljih radnih i životnih uvjeta u Europi. Prije svega je usmjeren na europodručje, ali primjenjuje se na sve države članice EU-a koje u njemu žele sudjelovati. 19. načelo govori o socijalnom stanovanju:

Stanovanje i pomoć beskućnicima:

- a. Onima kojima je to potrebno omogućuje se pristup socijalnim stanovima ili kvalitetnoj pomoći za stanovanje.
- b. Osjetljive/nemoćne/ugrožene osobe imaju pravo na primjerenu pomoć i zaštitu od prisilnih deložacija.
- c. Osiguravaju se primjerena skloništa i usluge za beskućnike radi promicanja njihove socijalne uključenosti [8].

3 Socijalno stanovanje

Važan faktor u održivom razvoju Europske unije u sferi stambene politike ima socijalno stanovanje.

Socijalno stanovanje je oblik stambenog zakupa u kojem se nekretnina nalazi u vlasništvu države, grada ili općine. Također, može se odnositi i na prodaju po posebnim uvjetima stambenih jedinica čija je izgradnja financirana od strane države, neprofitnih organizacija ili privatnog investitora pod jakom kontrolom države s ciljem pružanja priuštivog stanovanja.

U Austriji su općinske stambene zgrade za “low-cost“ javno stanovanje važan dio arhitekture i kulture Beča od 1920 – ih godina.

Finska je jedna od prvih zemalja u kojima se pojavljuje socijalno stanovanje. U Helsinkiju su godine 1909. građene drvene kuće. Stanovnici su bili uglavnom iz radničke klase obitelji s više djece. U stanovima je živjelo prosječno pet osoba u svakoj sobi, ponekad i do osam. Maleni stanovi opremljeni su tekućom vodom. Svaki stan je imao vlastiti zahod u podrumu. Električna rasvjeta uvedena je 1918.

Francuska ima dugu tradiciju državne intervencije na tržištu nekretnina. Nakon Drugog svjetskog rata broj stanovnika gradova naglo je porastao. Cijene najma naglo su porasle, a vlada uvodi 1949. Zakon o visini najma, što dovodi do stabilnosti tržišta. Vlada je pokrenula veliki plan izgradnje, uključujući i stvaranje novih gradova i predgrađa socijalnog stanovanja (u Francuskoj se naziva HLM stanovanje - Housing à Loyer Modéré ili stanovanje s niskim najmom). Kvaliteta stanova je učinkovito regulirana zakonima, što je rezultiralo u vrhunskom kvalitetom stanovanja 1950-ih i 1960-ih godina. Tijekom 2000-ih donesen je zakon kojim se obvezuje da svaki grad ili općina mora osigurati 20 % HLM od cjelokupnog stambenog fonda.

Između 1925. i 1930. Njemačka je mjesto inovativnih i opsežnih općinskih projekata javne stanogradnje, uglavnom u velikim gradovima.

U Hrvatskoj u vrijeme Austro – Ugarske, uslijed zakašnjele industrijalizacije i urbanizacije, nije bila razvijena tradicija socijalne politike u stanovanju. U međuratnom razdoblju gradske vlasti samostalno ili kao partner stambenim zadrugama sudjeluju u gradnji socijalnih stanova i naselja obiteljskih kuća. Nakon Drugog svjetskog rata socijalna politika vezana je uz nacionalizaciju dijela nekretnina, a s vremenom poduzeća od države preuzimaju stambeno zbrinjavanje svojih radnika.

U novom političkom sustavu 1990-ih godina smanjuje se uloga države u socijalnoj stambenoj politici, ukidaju se stambeni doprinosi i uloga poduzeća u stambenom zbrinjavanju radnika. Slijedom navedenog, dolazi do deregulacije, privatizacije i jačanja tržišta stanova. Provodi se prodaja društvenih stanova nositeljima stanarskog prava. Ratna razaranja i velike migracije stanovništva dodatno su unazadile stanje u stambenom sektoru.

Od kraja 1990 - ih do danas hrvatska je država provodila više socijalnih mjera u području stanovanja (zbrinjavanje stradalnika Domovinskog rata, subvencioniranje kre-

dita za određene društvene skupine, državni poticaji za stambenu štednju itd.), ali bez značajnijeg pozitivnog socijalnog učinka na cjelokupno društvo, kvalitetu i tržište stanova [9].

Najbliži model klasičnom sustavu socijalnog stanovanja je 2001. pokrenuti POS - društveno poticana stanogradnja, gdje je unaprijed određena povoljnija cijena kupnje stana u odnosu na tržišnu cijenu. Država je investitor, lokalna samouprava osigurava zemljište i komunalne priključke i osigurani su povoljni krediti za kupce kojima je uvjet da nemaju riješeno stambeno pitanje i da su kreditno sposobni.

Sve navedene mjere većinom nisu bile sveobuhvatne ili ih je direktno vodila država, bez instrumenata kojima bi se poticalo aktivno sudjelovanje građana u socijalnoj stambenoj politici (npr. u obliku stambenih zadruga i sl.).

U Strategiji borbe protiv siromaštva i socijalne isključivosti u Republici Hrvatskoj (2014. – 2020.) u poglavlju 4.3, između ostalih mjera, stoji da će država cjelovito osmišljenom stambenom politikom osigurati svakom građaninu dostupnost stambenog prostora adekvatnog standarda. Nadalje, spominje se da država ima cilj dodatno urediti tržište najma stanova [10].

Većina europskih zemalja ima dugogodišnju tradiciju socijalnog stanovanja. Ako je država uključena u veliki dio regulacije izgradnje, raspodjele, upravljanja, a sve kroz zakonodavstvo, povoljniji je i sigurniji položaj stanovnika države. Navest ćemo tri primjera politike socijalnog stanovanja u Europskoj uniji.

3.1 Socijalno stanovanje u Danskoj

Model danskog socijalnog stambenog zbrinjavanja, odnosno neprofitnog stanovanja sastoji se od iznajmljivanja socijalnih stanova po cijenama troška stanovanja od strane neprofitnih stambenih udruga. Posebno značenje danskog modela socijalnog stanovanja ima načelo demokracije stanara, što je u osnovi način organiziranog vođenja svakog stambenog fonda temeljenog na središnjoj ulozi koju imaju stanovnici. Neprofitni stambeni fond čini oko 20 % od ukupnog stambenog fonda u zemlji. Socijalno stambeno zbrinjavanje postoji još od početka 20. stoljeća, a vode ga neprofitne stambene udruge. Oni su zakonski regulirani od strane države, ali su zajednički u vlasništvu članova udruge.

Projekt se obično financira tako da 91 % kapitala posuđuje stambena udruga od banaka; općina plaća 7 % troškova u obliku bezgotovinskog zajma za temeljni kapital i jamči dio hipoteke; preostala 2 % pokrivena su depozitima stanara. Stambeni doplatci od općine dostupni su za stanare koji trebaju pomoć u plaćanju stanarine. Model financiranja socijalnog stanovanja u Danskoj uključuje i obnavljajući (revolving) fond. Socijalni se stanovi moraju iznajmiti po trošku najamnine, koji se temelje na povijesnim troškovima. Cijena najma se ne smanjuje kada se otkupi hipotekarni zajam. Umjesto toga, prihodi odlaze u Nacionalni građevinski fond, osnovan 1966. godine, koji koriste stambene udruge za neprofitne organizacije radi obnove, ali i financiraju novogradnju.

Na liste čekanja mogu se prijaviti svi od minimalne dobi od 15 godina. Većinu slobodnih jedinica stambene udruge dodjeljuju na temelju vremena čekanja i veličini kućanstva. Iako za korisnike nema granica prihoda, postoje ograničenja za troškove gradnje, a time i iznajmljivanje i veličinu stanova. Nadalje, postoje prioritetni kriteriji za dodjelu stanova, koji su definirani na temelju lokalnih uvjeta.

Primjerice, prioritet se može dati obiteljima s djecom, osobama s invaliditetom, izbjeglicama, starijima, studentima, razvedenima, ljudima koji se trebaju približiti svom radnom mjestu. U područjima s mnogim nezaposlenima, prioritet se može dati "uzorima" kao što su osobe s poslom ili studenti.

Općine imaju pravo dodijeliti stanarima najmanje 25 % slobodnih jedinica stambenih udruga, a u nekim slučajevima, u dogovoru sa stambenom udrugom, imaju pravo odobravanja svih jedinica. U slučaju izravne dodjele općine, korisnici ne moraju biti registrirani na listi čekanja [11].

3.2 Socijalno stanovanje u Nizozemskoj

Nizozemska je zemlja s najvećim udjelom socijalnog stanovanja u EU, koja čini oko 32 % ukupnog stambenog fonda i oko 75 % stanova za najam u zemlji. U Nizozemskoj ne postoji jedinstvena definicija socijalnog stanovanja.

U odluci Europske komisije iz 2010. godine nizozemski je sustav socijalnog stanovanja definiran kao stambeno zbrinjavanje po nižoj tržišnoj cijeni ciljane skupine ljudi u nepovoljnom položaju ili skupina s društveno nepovoljnim položajem, kao i određene ciljane kategorije radnika. Davatelji usluga socijalnog stanovanja mogu pružiti i druge srodne usluge ciljanim skupinama.

Socijalno stanovanje pružaju registrirane privatne neprofitne socijalne stambene organizacije u Nizozemskoj (Woning corporaties) sa zakonski određenim zadatkom da daju prioritet kućanstavima s nižim primanjima. Djeluju na temelju registracije i nadzire ih vlada. Iako stambene udruge rade u okviru zakonskog okvira koji je uspostavila država, one su neovisne organizacije, postavljaju svoje ciljeve i snose svoje financijske odgovornosti.

Socijalne stambene organizacije najvažnije su agencije na nizozemskom stambenom tržištu, a njihova je zadaća ne samo izgradnja, održavanje, prodaja i iznajmljivanje socijalnih stambenog fonda nego i pružanje drugih vrsta usluga stanarima izravno povezanih s korištenjem stanova.

Socijalne stambene organizacije u Nizozemskoj, iako su zadržale svoju socijalnu predanost, financijski su neovisne o središnjoj državi od 1993. godine. Nizozemska financijska strategija definirana je kao model obnavljajućeg (revolving) fonda, gdje stambene udruge djeluju kao neovisna tijela u okruženju zajamčenih zajmova tržišta kapitala i regulacije najamnine. Registrirane socijalne stambene organizacije imaju tri razine sigurnosne strukture: prvi element je Središnji fond socijalnog stanovanja (CFV), nezavisno javno tijelo koje djeluje kao nadzornik financijske situacije organizacije i interve-

nira kako bi pružila potporu organizaciji u financijskim problemima. Drugi sigurnosni instrument je Jamstveni fond za socijalno stanovanje (WSW), privatna organizacija koju su stvorile same stambene organizacije koje djeluju kao fond solidarnosti među njima. Zajedničko jamstvo toga fonda omogućava socijalnim stambenim organizacijama povoljne uvjete i kamatne stope prilikom financiranja na tržištu kapitala. U slučaju da ova dva instrumenta nisu dovoljna za prevladavanje gospodarskih problema, država i lokalne vlasti mogu intervenirati djelujući kao zadnji sigurnosni instrument.

Mehanizmi raspodjele i kriteriji razlikuju se ovisno o lokalnoj / regionalnoj situaciji. Pristup socijalnom stambenom zbrinjavanju u Nizozemskoj nije bio ograničen na temelju dohotka i otvoren je za sve građane. Ipak prije spomenuta odluka Europske komisije promijenila je univerzalni pristup usmjeravanjem na pružanje socijalnog stanovanja ciljanim skupinama ljudi, prije svega definiranim kriterijem visine prihoda [12].

3.3 Socijalno stanovanje u Švedskoj

U Švedskoj se pojam "socijalno stanovanje" ne rabi. Odgovarajući sektor naziva se "allmännyttig", što doslovno znači "javno dobro". Ovaj se sektor sastoji od stanova za iznajmljivanje, u vlasništvu općinskih stambenih tvrtki koje su organizirane kao dionička društva (društva s ograničenom odgovornošću). U većini slučajeva lokalne vlasti imaju sve dionice. Cilj tih tvrtki je unaprjeđenje stanovanja u svojoj općini, ali djeluju na poslovnim načelima.

Općinske stambene tvrtke moraju raditi radi poboljšanja javne dobrobiti ne samo za najugroženije, već za sve društvene skupine. Krovna stambena organizacija je SABO. Izgradnjom stanova se bave javne tvrtke u vlasništvu općina koje posjeduju i upravljaju s 802 000 stanova, što je oko 20 % ukupnog stambenog fonda Švedske. Cijena najma temelji se na cijeni troškova izgradnje ili održavanja.

Više nema stambenih subvencija. Ulaganja u javne stanove moraju biti financirana prihodima koji potječu iz rente. Javna stambena poduzeća nemaju posebne prednosti ili prednosti u odnosu na privatni sektor iznajmljivanja.

Da bi se izbjegla stigmatizacija javnih stambenih zgrada ili stambenih područja, sektor je otvoren za svakoga. Nema granica prihoda ili sličnih uvjeta. Svrha je osigurati stambeno zbrinjavanje za sve, također i za manje povlaštene. Međutim, u praksi obično nisu bogati ljudi koji žive u javnom stambenom sektoru. U odnosu na ostale sektore i oblike stanovanja, stanovnici javnih stanova u prosjeku su lošijeg imovnog stanja. Oni imaju niži dohodak, pokazuju veće stope nezaposlenosti i ostvaruju više socijalnih naknada. Oni su također u većoj mjeri samci ili samohrani roditelji i češće imigranti [13].

4 Zaključak

Cilj je ovog rada bio je ukratko opisati trendove europskih stambenih politika i socijalnog stanovanja. Pravo na zdrav, pristojan i priuštiv stan ima svaki građanin Europske unije bez obzira na rasu, naciju, vjeru ili novčane prihode. Europska stambena povelja naglašava socijalnu osviještenost Unije, ustrajnost u borbi protiv diskriminacije i beskućništva.

Isključenje iz stanovanja, beskućništvo i nedostadni uvjeti stanovanja moraju se nadvladati jer krše temeljna prava Europske unije i interese zajednice.

Svaka socijalna država ima stambenu politiku koja ovisi o nizu gospodarskih, strateških, političkih i društvenih faktora svake pojedine zemlje. Ciljevi stambene politike su organizacija socijalnog stanovanja, odnosno ispunjenje potreba stanovništva, reguliranje i kontrola kvalitete tržišta nekretnina. U okviru razvoja socijalnog stanovanja europske su zemlje postigle različite razine standarda stanovanja. Europske zemlje nemaju zajedničku socijalnu stambenu politiku pa su prisutni različiti modeli. U ovom radu prikazana su tri modela država iz sjeverne Europe s tradicijom socijalne politike, jakim zakonodavstvom i visokog općeg blagostanja, a koje bi mogle poslužiti kao primjer Hrvatskoj za uspješniju stambenu politiku, regulaciju tržišta stanova, kvalitetniji sustav prostornog planiranja, projektiranja i stanogradnje.

Literatura

- [1] Narodne novine, http://narodne-novine.nn.hr/clanci/medunarodni/2009_11_12_143.html, pristupljeno: 03.09.2017.
- [2] Council of Europe, <https://www.coe.int/en/web/conventions/full-list/-conventions/rms/090000168007cf93>, pristupljeno: 03.09.2017.
- [3] Zaključci Europskog vijeća (1993. – 2003.), <http://www.consilium.europa.eu/hr/european-council/conclusions/1993-2003/>, pristupljeno: 03.09.2017.
- [4] Pristup zakonodavstvu Europske unije, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:12007P&from=HR>, pristupljeno: 03.09.2017.
- [5] Europska stambena povelja, Revija za socijalnu politiku, 2007, 14 (3-4): 391-399, Zagreb
- [6] URBAN Intergroup at the European Parliament, <http://urban-intergroup.eu/about-us/>, pristupljeno: 14.07.2017.
- [7] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja RH, http://www.mgipu.hr/doc/Prostorno/TeritorijalnaKohezija/Leipzigiska_Povelja.pdf, pristupljeno: 14.07.2017.
- [8] European Commission, https://ec.europa.eu/commission/priorities/deeper-and-fairer-economic-and-monetary-union/european-pillar-social-rights_en, pristupljeno: 14.07.2017.

- [9] Bežovan, G.: Stanovanje i stambena politika u Hrvatskoj
- [10] Vlada Republike Hrvatske, <https://vlada.gov.hr/UserDocsImages/ZPPI/Strategije/Strategija%20borbe%20protiv%20siroma%C5%A1tva.pdf>, pristupljeno: 03.09.2017.
- [11] Social Housing in Europe, Denmark, <http://www.housingeurope.eu/resource-102/social-housing-in-europe>, pristupljeno: 03.09.2017.
- [12] Social Housing in Europe, The Netherlands, <http://www.housingeurope.eu/resource-117/social-housing-in-europe>, pristupljeno: 03.09.2017.
- [13] Social Housing in Europe, Sweden, <http://www.housingeurope.eu/resource-125/social-housing-in-europe>, pristupljeno: 03.09.2017

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.29>

Utopije današnjice - "climate-friendly" gradovi

Anja Milovanović¹, Nađa Kurtović-Folić¹, Olivera Lekić²

¹ Sveučilište u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

² Sveučilište u Prištini s privremenim središtem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet tehničkih nauka

kontakt: anjamilovanovic88@gmail.com

Sažetak

Promjena klime postaje sve očitija i njena razorna moć ostavlja nesagledive negativne posljedice na naš planet i njegovo normalno funkcioniranje. Čovjek je svojim djelovanjem doveo do intenziviranja negativnih promjena i žalost učinio reverzibilnu opciju gotovo nemogućom. Kao jedan od najvećih problema današnjice, koji onemogućava zaista ozbiljnu borbu za povratak našeg ekosustava u normalno stanje, jest globalna, kolektivna nesavjesnost o posljedicama djelovanja čovjeka. Iako je maštao o utopijama i idealnim gradovima, svojim postupcima čovjek je doveo svijet u kome živi u stanje daleko od idealnog. Štoviše, on je sasvim narušio nekadašnju ravnotežu između prirode i samog čovjeka. Pionirski koraci u bitci s klimom su napravljeni, a glavni princip na kome se sve zasniva je racionalna uporaba energije i smanjenje emisije negativnih tvari, kako bi se osnovni ljudski faktori koji utječu na promjenu klime sveli na minimum. Kao jedan od nivoa djelovanja navodi se i gradogradnja u okviru koje je razvijen zaseban set mjera i principa. Za ultimativni cilj na nivou arhitektonskog djelovanja identificirano je stvaranje tzv. nulte arhitekture.

Ključne riječi: klimatske promjene, energetska efikasnost, utopije, strategije adaptacija i mitigacija

Present-day utopias: climate-friendly cities

Abstract

The climate change has become increasingly evident and its destructive power has immeasurable negative consequences for our planet and its normal functioning. Humans have contributed to the intensity of these changes by their actions and have unfortunately made a reversible option almost impossible. A global collective unawareness of the consequences of human actions is one of the biggest problems of today's world, which practically prevents a full-fledged struggle for the return of our ecosystem to its original normal form. Even though humans have fantasized about utopias and ideal cities, they have made the world a place far away from ideal. In addition, humans have totally ruined the former balance between man and nature. Nevertheless, initial steps in the climate struggle have been made, and the main principle everything is based on is the rational use of energy, and reduction of emission of negative substances in order to minimise human factor that could influence climate change. Construction of cities involving a special set of measurements and principles is stated as one of possible levels of action to be taken in this respect. Creation of the so called "zero" architecture is identified as an ultimate goal at the architectural level of action.

Keywords: climate changes, energy efficiency, utopias, adaptation and mitigation strategies

1 Uvod

Utopijski ideal života i ideja o idealnom gradu potječe iz vremena renesanse, ali su u svojem prvotnom obliku postojali i stoljećima prije toga, još od antičkih vremena i prvih ljudskih naseobina. Ti su se ideali razvijali s vremenom, sve do današnjih suvremenih, futurističkih crteža, i oduvijek su bili dio studija velikana arhitekture i gradogradnje. Međutim, kod prvobitnih idealnih gradova najveća pažnja posvećivala se samoj formi grada viđenoj kao savršen kalup koji je stvoren da traje zauvijek [1]. Ti gradovi su bili strogo estetski oblikovani artefakti, uklopljeni u savršene geometrijske sheme, dok se o samim funkcijama grada razmišljalo veoma malo, te se osim toj geometrijskoj pravilnosti epitet savršen nije mogao ničemu više pripisati [2]. Zajedno s inovacijama u znanosti i tehnici, a prije svega u industriji, dolazi razdoblje tehničke arhitekture, čiji je ideal kompleksnija odrednica koja je osim oblika rješavala i pitanja stanovanja, rada, odmora i prometa. Gradovi iz vremena industrijske revolucije imaju mnogo više stanovnika nego gradovi srednjeg vijeka, pa se samim tim javio i novi izazov oblikovanja koji je trebalo riješiti. Ali upravo spomenuta revolucija, kao i porast broja svjetskog stanovništva i nesavjestan način života u smislu energetske učinkovitosti, ostavili su sad već posve sigurno izuzetno negativne posljedice na opstanak našega planeta. Čovjekova okolina je kontaminirana svim nusproduktima spomenutog nevjerojatnog napretka, u vremenu u kojem se nije vodila briga o okolišu niti je postojala savjest o njegovoj važnosti i očuvanju, ili se nije željela saznati istina o tome. Brojni su dokazi o promjeni klime o čemu svjedoče i mnoge enciklopedije [3-6]. Gradovi današnjice se zbog toga suočavaju s najvećim izazovom ikada - klimatskim promjenama za čije je intenziviranje odgovoran upravo čovjek [7]. Kao glavno oružje u ovoj bitci za naše utopije budućnosti - gradove prilagođene klimi, izabrana je upravo energetska učinkovitost [7, 8].

2 Klimatske promjene

Kada promatramo klimatske promjene u globalu, mora se uzeti u obzir da taj pojam podrazumijeva upravo dualitet, tj. postojanje dviju odvojenih formacija koje se međusobno superponiraju i čine klimatsku simbiozu [9]. S jedne strane spomenutu klimatsku transformaciju čine promjene nastale prirodnim slijedom, tj. normalnim razvojem našega planeta, dok su s druge strane promjene koje su nastale kao direktne ili indirektno posljedice ljudske aktivnosti. Antropogeni utjecaj na klimu prvi put je definirao 1990. godine Međuvladin panel za klimatske promjene u obliku kompleksne znanstvene studije poznate kao Prvi izvještaj [10]. Od ovog pionirskog koraka do danas nastale su brojne konvencije od kojih je najpoznatija Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama [11], kao i veliki broj strateških dokumenata adaptacija među kojima se izdvajaju Kjoto protokol [12], Hjogo akcioni okvir [13], Beli papir

[14], kao i EU klimatski i energetska paket poznatiji pod imenom "20-20-20" [15]. Neki od najvažnijih zaključaka svih istraživanja jesu da klimatske promjene neosporno postoje, da se učinak staklenika i emisije štetnih plinova povećavaju iz godine u godinu, kao i da su očekivane posljedice globalni porast temperature i nivoa svjetskog mora. Također, nemoguće je davati apsolutno točne prognoze uslijed kompleksnosti klimatskog sustava i načina općeg funkcioniranja planeta, pa se stoga sve projekcije i modeli klimatskih promjena moraju uzeti s rezervom [7, 16].

3 Utjecaj klimatskih promjena na arhitekturu grada

Životno čovjekovo obitavalište već je dulje vrijeme pod jakim utjecajem sve očitije promjene klime, posebno u pogledu porasta temperature, povećanja učestalosti snažnih nevremena i njihova intenziteta, presušivanja izvora vode, kao i topljenja sjevernog ledenog pokrivača čija je izravna posljedica porast svjetskog mora [7, 9]. Sve je veći broj svjetskih metropola, gradova i sela koji se suočavaju s negativnim posljedicama promjenjivosti klime. Svjetska javnost, a posebno znanstveni sektor, uočivši stupanj ozbiljnosti ovih promjena, kao i postotak udjela čovjeka i njegove aktivnosti u njima, pokrenula je čitav sustav adekvatnih akcija i istraživačkih procesa kojima bi razvoj tih promjena postao jasniji, kao i zbog otkrivanja mogućih mjera prevencije i zaštite. Imajući na umu da klimatske promjene nije moguće zaustaviti, istraživanja su se bazirala na adaptivnim i mitigacijskim mjerama. Te su mjere implementirane i u domenu arhitekture i urbanizma, kako u sferi održavanja postojećeg urbanog i ruralnog tkiva, tako i u sferi planiranja i projektiranja budućih [17, 18]. Glavno je težište usmjereno na smanjenje potrebne energije za funkcioniranje životnih prostora čime bi se smanjila i emisija pratećih negativnih tvari, a to simultano predstavlja i jedan od najvažnijih oblikovnih principa energetske učinkovite arhitekture. Sama promjena u arhitekturi ogledala se kroz primjenu novih energetske učinkovitih materijala kao i principa ekološke gradnje, ozelenjivanjem prostora, primjenom alternativnih obnovljivih izvora energije poput sunca, vjetra i geotermalnih izvora, racionalnim projektiranjem i mnogim drugim principima. Istraživanje potrošnje energije u sferi arhitekture još više dobiva na važnosti ako se uzme u obzir podatak da je više od 40 % svjetske potrošnje energije vezano upravo za stambene građevine, točnije njihovo korištenje [7]. Ultimativno rješenje do kojeg se došlo jest tzv. nulta arhitektura, tj. arhitektura kod koje sama građevina proizvodi svu potrebnu energiju za svoje funkcioniranje, s minimalnom emisijom negativnih tvari [19-21].



Slika 1. Potrošnja energije u zgradama

4 Potreba za istraživanjem i znanstveni problemi

Imajući na umu brojne negativne posljedice klimatskih promjena s kojima je svijet već suočen, nevjerojatan progres tih promjena, kao i ne tako optimistična predviđanja budućih transformacija, potreba za istraživanjem više je nego očita. Mnogi europski i svjetski gradovi i države donijeli su svoje strategije i planove razvoja, planiranja i projektiranja koje su u skladu s nastupajućim promjenama. Što se tiče regije jugoistočne Europe kojoj pripadamo, a koja će prema svim scenarijima biti itekako pogođena promjenom klime, vrlo mali broj država ima svoju klimatsku akcijsku platformu. Postoji velik broj inicijativa, od stručne i civilne javnosti, koji svojim djelovanjem stvaraju kvalitetnu podlogu za buduće pothvate u ovoj sferi. Međutim, postoje i brojni problemi koji onemogućavaju bolje djelovanje protiv klimatskih promjena. Ponajprije, kompleksnost klimatskog sustava u čije je funkcioniranje uključen vrlo velik broj varijabli, te je stoga iznimno teško predvidjeti do kakvih će sve promjena doći. Također, iako su dokazi o ovim promjenama evidentirani prije više od četvrt stoljeća, njihovo rješavanje istih ide vrlo sporo, dok progres promjena ide uzlaznom putanjom. Jedan od najvećih problema je opća kolektivna nesavjesnost, pa su klimatske promjene za običnog čovjeka i dalje samo imaginarna slika nekakvog armagedona iz znanstveno-fantastičnih filmova.

5 Ciljevi istraživanja

Kao glavni cilj istraživanja klimatskih promjena, u svijetu na globalnoj razini i u regiji jugoistočne Europe na regionalnoj i lokalnoj razini, izdvaja se priprema regionalne platforme za borbu protiv klimatskih promjena. Poseban naglasak se stavlja na odgovor arhitekture na spomenute promjene i njezino prilagođavanje klimatskoj transformaciji, kako bi se ona s vremenom ublažila i omogućila normalan nastavak živo-

ta. Analiziranjem postojećih strategija zemalja koje su već napravile velike pionirske korake prema ozbiljnoj borbi protiv surovosti klime, stječe se osnovno znanje koje se posebnim modifikacijama može prilagoditi potrebama naše regije. Kao primarni ciljevi istraživanja, čiji će proces i krajnji rezultati biti prikazani u obliku doktorskog rada, izdvajaju se:

- analitičko istraživanje klimatskih scenarija kako bi se stekao uvid u promjene koje nas očekuju
- analiza institucionalnih okvira i selektivni izbor međunarodnih i nacionalnih dokumenata koji će poslužiti kao osnova za stvaranje naše vlastite strategije
- istraživanje ljudskih djelatnosti u regijama koje su potpomogle daljnji i ubrzani razvoj klimatskih promjena, kao i njihovo intenziviranje u proteklim desetljećima
- utvrđivanje seta indikatora i praktičnih mjera adaptacija i mitigacija kojima bi se na nacionalnom i regionalnom nivou smanjio utjecaj klimatskih promjena
- pokretanje javnih rasprava o promjeni klime i podizanje javne svijesti o ovom globalnom problemu
- sinteza donesenih zaključaka i postavljanje temelja sinkroniziranoj regionalnoj politici u vezi s promjenama klime.

Kao posebni ciljevi izdvajaju se mjere djelovanja u sferi adaptacija na klimatske promjene, a koje se odnose na svijet arhitekture i građevinarstva. Među njima najviše se ističe racionalno projektiranje i gradnja koji bi bili u skladu s potrebnom i predviđenom energetsom učinkovitošću, primjena principa ekološke "zelene" gradnje i uređenja prostora, kao i upotreba inovativnih materijala, tehnologija i instalacijskih sustava, kako u stvaranju novih životnih prostora, tako i rekonstrukciji starih. Ovaj je rad zapravo uvod u problem klimatskih promjena, kao i definiciju njihove primarne pozicije u svijetu arhitekture i građevinarstva. S druge strane rad daje pregled relevantne literature koja može poslužiti kao vrlo dobra osnova za sva buduća istraživanja na području "climate-friendly" gradova.

6 Očekivani rezultati istraživanja

Rezultati za koje se očekuje da će biti potvrđeni istraživanjem imaju primjenu primarno u daljnjim teorijskim istraživanjima, a onda svakako i u praktičnom djelovanju na osnovi nacionalnih i regionalnih strategija. Osnovni očekivani rezultati su:

- potvrda postojanja klimatskih promjena na regionalnoj razini
- utvrđivanje najintenzivnijih izvorišta nesavjesnog korištenja energije
- dobivanje osnovnog opsega djelovanja protiv klimatskih promjena deduktivnim analiziranjem strategija naprednih zemalja
- stvaranje primarnog seta indikatora, kao i prijedloga adaptacijskih i mitigacijskih mjera, s posebnim osvrtom na mjere vezana za arhitektonsko djelovanje

- iniciranje stvaranja klimatske platforme i regionalnih i nacionalnih strategija
- utvrđivanje posebnih setova mjera vezanih za arhitektonsko djelovanje u vezi s klimatskim promjenama.

7 Zaključak

Unatoč cjelokupnom tehnološkom i znanstvenom razvoju, čovjek je i dalje samo jedinka koja je apsolutno neodvojiva od prirodne sredine u kojoj živi, kao što je i izravno ovisan o svim procesima koji se u toj sredini događaju. Vodeći se idealima urbanih utopija i željom da stvori novi i bolji svijet, čovječanstvo se nažalost zaboravilo brinuti o osjetljivosti planeta. Osim ideala kao zavisne varijable, koji se mijenjao zajedno s razvojem čovjekovog znanja, simultano se kao posljedica nesavjesne uporabe prirodnih resursa mijenjala i klima ekosustava. Posljedice su tih promjena sve očitije i sve više narušavaju normalan život i njegovo buduće postojanje. Borba je započeta krajem prošlog stoljeća, ali je nažalost još uvijek tek u povoju. Energetska učinkovitost jedan je od osnovnih principa na kome se borba zasniva, a ona je ujedno postala jedna od glavnih oblikovnih i funkcionalnih elemenata arhitekture, kako današnjice tako i budućnosti. Pionirski koraci su napravljeni u obliku strategija adaptacije i mitigacije na klimatsku transformaciju, ali još uvijek je globalna svijest o tom problemu na vrlo niskoj razini. Stoga je krajnje vrijeme da svaki čovjek postane svjestan svog negativnog utjecaja na životnu okolinu i nošen parolom “misli globalno, djeluj lokalno” počne preuzimati odgovornost za svoje postupke i poduzme mjere kojima bi zaštitio planet. Možda i nije potreban epitet idealan uz grad u kome živimo. Možda je potrebno samo povratiti ravnotežu između prirode i čovjeka stvaranjem “climate-friendly” gradova i na taj način ostvariti davno sanjanu utopiju.

Literatura

- [1] Milić, B.: Razvoj grada kroz stoljeća III - Novo doba, Školska knjiga, 2002.
- [2] Zigfrid, G.: Prostor, vrijeme, arhitektura, Građevinska knjiga, 2002.
- [3] Dutch, I.S.: Encyclopedia of Global Warming Vol. I, Salem Press, 2010.
- [4] Philander, S.G.: Encyclopedia of Global Warming and Climate Change, 1-3 (2008).
- [5] Johansen, B.E.: The Encyclopedia of Global Warming - Science and Technology, ABC Clío, 2009.
- [6] Oliver, J.E.: Encyclopedia of World Climatology, Springer, 2005.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2014 - Synthesis Report, IPCC, 2015.

- [8] Dong, G., DeFrancia, K., Chen, M., Filltraut, B., Zhang, C.: Assessing Sustainability - Framework and Indices, Earth Institute, Columbia University, 2015.
- [9] Procjena ranjivosti na klimatske promjene - Srbija, WWF, 2012.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change, IPCC, 1990.
- [11] United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, 1992.
- [12] Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, 1998.
- [13] Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters, United Nations, 2005.
- [14] Water Paper, Adapting to Climate Change: Towards a European framework for Action, Commission of The European Communities, 2009.
- [15] EU Climate and Energy Policies Post 2020 - Energy Security, Competitiveness and Decarbonisation, EPRS, 2014.
- [16] Climate Change 2013 - The Physical Science Book: Foreword, Preface and Dedication, IPCC, 2013.
- [17] Utjecaj klimatskih promjena na planiranje i projektiranje, Arhitektonski fakultet Beograd, 2011.
- [18] Budućnost razvoja naselja u svijetlu klimatskih promjena, Društvo urbanista Beograda, 2011.
- [19] Pittock, A.B.: Climate Change - The Science, Impacts and Solutions, Earthscan, 2009.
- [20] Adger, W.N., Kelly, M.P.: Social Vulnerability to Climate Change and the Architecture of Entitlements, 1999.
- [21] Architects and Climate Change, AIA, 2010.

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.35>

Odnos integracijske jezgre i povijesnih slojeva – upotreba sintakse prostora u planerskim usporedbama gradova

Tamara Zaninović, Bojana Bojanić Obad Šćitaroci

Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet
kontakt: tmaric@arhitekt.hr

Sažetak

Rad istražuje gradove srednje Europe spajajući metodu sintakse prostora i urbanizma naslijeđa koja je primijenjena u doktorskom istraživanju o preobrazbama povijesnih prilaznih putova u gradske ulice. Cilj je, usporedbom glavnih gradova Beča, Budimpešte, Praga, Ljubljane i Zagreba, utvrditi razlike pri korištenju aksijalnih i segmentnih karata gradova. Glavna istraživačka pitanja pri tome su: 1. postoje li pravilnosti u odnosu između smještaja povijesne gradske jezgre i integracijske sintaktičke jezgre u suvremenoj morfologiji grada; 2. koji je odnos između sustava povijesnih prilaznih putova, povijesne i integracijske jezgre grada. Rezultati pokazuju važnost spajanja uvriježenih planerskih metoda u GIS-u za razumijevanje kompleksnih i multidisciplinarnih tema kao što su razvoj i širenje gradova s mogućnošću primjene u planiranju urbanih prostornih cjelina poštujući povijesne vrijednosti i slojeve.

Ključne riječi: prilazni putovi, urbanizam naslijeđa, sintaksa prostora, srednja Europa

Integration core and historic urban layers relation - using space syntax for city comparison

Abstract

This paper explores Central European cities by combining space syntax methodology and heritage urbanism. This combination of methods is being used for PhD research about historical pathways and their transformation into urban streets. Aim is to compare the capitals: Vienna, Budapest, Prague, Zagreb and Ljubljana to determine differences between axial and segment maps. The main research questions are: 1. are there regularities between the placement of historical and syntactical integration core of the cities; 2. what is the relation between the system of historical gateway-pathways and urban cores. Results show the importance of combining usual planning methods in GIS for understanding complex and multidisciplinary topics such as urban development and spreading of cities with the possibility of application in spatial planning.

Keywords: gateway-pathways, heritage urbanism, space syntax, Central Europe

1 Uvod

Tema istraživanja je povijesno u suvremenom s prostorno-planerskog i morfološkog aspekta. Predmet istraživanja je pitanje centralnosti postavljen kao odnos između gradske jezgre i povijesnih prilaznih putova koji su prije urbanih ekspanzija 19. i 20. stoljeća vodili u gradove. Na povijesnim kartama moguće je identificirati sustav povijesnih putova unutar kojeg se prilazi ističu prema važnosti u grafičkoj oznaci, kontinuitetu trase i prostorima koje povezuju. To su trase koje se neprestano mijenjaju kako se grad širi i razvija jer povezuju periferiju s centrom ili centrima. Pretpostavka doktorskog istraživanja doktorandice Tehničkog sveučilišta u Beču (TU Wien) Tamare Zaninović jest ta da su povijesni prilazni putovi urbano naslijeđe i gradske cjeline čije su preobrazbe bitne za uravnoteženo prostorno planiranje i razvoj. Istraživanje je dio istraživačkog projekta *Urbanizma naslijeđa / Heritage Urbanism* (HERU HRZZ-2032) koji se provodi na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom akademika Mladena Obada Šćitarocija, a djelomično je financirano sredstvima Hrvatske zaklade za znanost. Cilj ovoga rada je na usporedbi različitih glavnih gradova utvrditi kako identificirati gradsku jezgru i proučiti odnos između povijesnih i suvremenih slojeva. U radu se primjenjuju suvremene uvriježene metode i alati sintakse prostora i GIS-a kako bi se znanja različitih disciplina mogla preklapati u zaključcima, a istraživanje počinje s upoznavanje povijesnih slojeva s prostornoplanskog aspekta.

2 Metodologija istraživanja

2.1 Urbanizam naslijeđa – povijesni slojevi u suvremenom kontekstu

Istraživački projekt *Urbanizam naslijeđa* (HERU) usmjeren je na primjene metoda prostornog planiranja uz razmatranje graditeljskog naslijeđa kao aktivnog subjekta u urbanom razvoju prostora. Unutar HERU pristupa prilazne ulice čine uz gradsku povijesnu jezgru naslijeđe kao prepoznatljivu matricu grada. Pri obradi povijesnih slojeva korištene su austrijske vojne izmjere (I., II. i III.), na kojima su mapirani srednjoeuropski gradovi u tadašnjem sastavu Habsburškoga carstva, što čini podatke usporedivima. Njihovim proučavanjem utvrđene su vrste i karakteristike povijesnih gradskih jezgri u odnosu na mrežu povijesnih putova. Radi provjere i proučavanja povijesnog u suvremenom kontekstu, povijesne karte vojnih izmjera i ostalih planova su geokodirane i preklapljene u GIS-u. Na taj način mogu se promatrati i preobrazbe u sustavu prilaznih putova koje su nastale širenjem grada te razvojem prometa i stvaranjem novih načina pristupa gradovima (željeznica, autocesta i zračne luke). Preobrazbe pokazuju karakteristike kompleksnih sustava koje je moguće mjeriti prostornim mjerama teorije sintakse prostora.

2.2 Sintaksa prostora / *Space Syntax* – prostorna konfiguracija i korištenje

Sintaksa prostora je teorija koja pojašnjava odnos između prostornih karakteristika i socijalnih događaja i interakcija. Nastala je krajem 1970-ih godina na Bartlettu, *University College London*, kako bi se predvidjele posljedice ljudskog djelovanja za planiranje i projektiranje prostora, a od tada su razvili još niz alata za analizu prostornih tlocrta i uzoraka ljudskih aktivnosti. Teorija i metodologija sintakse prostora razrađena je na raznim modelima i studijama slučaja, u brojnim znanstvenim radovima, doktoratima i knjigama pri čemu su korišteni različiti oblici reprezentacije prostornih tlocrta (aksijalne linije, segmenti, konveksni prostori, isoviste i grafovi konfiguracijskih odnosa) iz kojih se računaju i analiziraju udaljenosti (topološka, kutna ili metrička) i sintaktičke mjere (poput integracije i izbora – eng. *integration and choice* – pri različitim radijusima proračuna) [1]. Metoda postavljena u radu za 11. *Space Syntax* simpozij u Lisabonu prilagođena je ovdje za usporedbu gradova [2]. Glavna sintaktička mjera koju koristimo u ovome istraživanju je integracija, koja se interpretira kao “kretanje prema” ili koliko je vjerojatno da je određeni prostor određite kretanja u sustavu.

2.3 Ograničenja u istraživanju, izvori i prijelop podataka u GIS-u

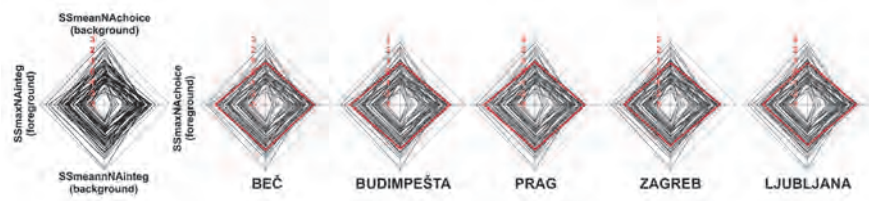
Povijesne karte koje su korištene u istraživanju i identifikaciji povijesnih putova i povijesne jezgre su vojne izmjere područja Habsburškog carstva, koje svjedoče o stanju u 18. i 19. stoljeću kada se gradovi počinju ubrzano širiti izvan povijesne gradske jezgre. Izbor gradova ovisio je o nekoliko kriterija: 1. da su povijesno imali regionalnu važnost; 2. da su u mjerilu grada doživjeli bitan rast i razvoj, 3. o stupnju dostupnosti i postojanju potrebnih materijala za sintaksu prostora. Karta Zagreba pripremljena je u Londonu tijekom 2016. godine. Karte ostalih gradova su izrađene na različite načine pri organizaciji eng. *Space Syntax Limited* za potrebe određenih projekata. Karte za Beč i Budimpeštu su novijeg datuma, a Ljubljane i Praga su starije. Beč i Prag imaju aksijalne karte, a Ljubljana i Budimpešta segmentne karte. Karta Budimpešte napravljena je jedina metodom prebacivanja središnjih osi kolnika u segmentnu kartu. Proučavanje rezultata dobivenih iz analiza različitih karata važno je kako bi se odredila mogućnost usporedbe i vjerodostojnost podataka dobivenih za doktorsko istraživanje u ovisnosti o navedenim razlikama.

3 Usporedba rezultata na studijama slučaja

3.1 Usporedba gradova – mjerilo i “model zvijezde”

Imajući na umu da su korištene karte izrađene na različite načine, glavna metoda usporedbe suvremenog sustava gradova je primjena normaliziranih vrijednosti za segmentne analize. Metoda usporedbe je nazvana “model zvijezde” (*star model*) i primi-

jenio ju je i detaljno opisao Bill Hillier na usporedbi 50 gradova [3]. Koristeći Hillierov dijagram preklapili smo ga grafički (slika 1.) s rezultatima za Beč, Budimpeštu, Prag, Zagreb i Ljubljanu. U tablici 1. prikazane su numeričke vrijednosti iz dijagrama; najviše vrijednosti označene su u crvenoj, a najmanje u plavoj boji.



Slika 1. Usporedba gradova na zvjezdanom modelu iz vrijednosti u tablici 1.

Tablica 1. Srednje (*mean*) i maksimalne (*max*) normalizirane vrijednosti sintaktičke mjere izbora (*choice*; NACH) i integracije (*integration*; NAIN)

		Beč	Budimpešta	Prag	Zagreb	Ljubljana
NACH (Rn)	Mean	0.921322	0.856645	0.933437	0.791153	0.813084
	Max	1.5281	1.58504	1.606024	1.537413	1.52259
NAIN (Rn)	Mean	1.10303	0.987549	1.064949	0.714623	0.722473
	Max	1.64491	1.61493	1.703736	1.239276	1.16074

3.2 Odnos povijesne jezgre, integracijske jezgre i prilaznih putova

Gradovi u Europi bili su povijesno utvrđeni i definirani zidinama. Prilazni putovi vode ovisno o topografiji ili direktno do zidina ili indirektno u neposrednu okolinu zidina. Zidinama utvrđena povijesna područja i njihova neposredna izgrađena okolina na kartama iz 18. i 19. stoljeća su ovim istraživanjem definirana kao povijesne gradske jezgre (skice na slici 2. - crna površina). Uzorci ulica povijesne gradske jezgre nisu predmet istraživanja, budući da su povijesna središta već istražena s brojnih aspekata o čemu svjedoči i broj UNESCO-ovih zaštićenih povijesnih središta.

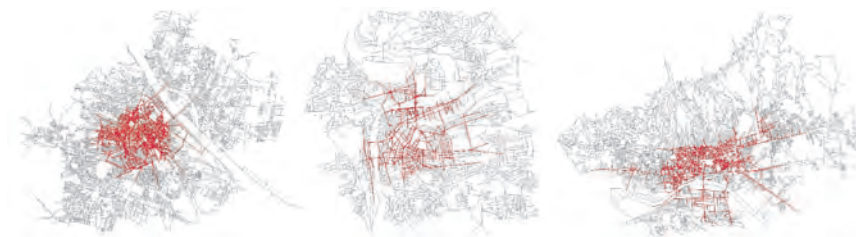


Slika 2. Povijesne gradske jezgre i prilazni putovi precrtano i grafički interpretirano s austrijskih vojnih izmjera: Beč, Budimpešta, Prag, Zagreb i Ljubljana, ©TZaninovic



Slika 3. Segmentne karte Beča, Budimpešte, Praga, Zagreba i Ljubljane s označenom integracijskom jezgrom (crveno) i povijesnim jezgrama (elipse i kružnice), Izvori karata: ©Space Syntax ©OpenStreetMap contributors

Bill Hillier je postavio teoriju centralnosti kao procesa, usmjeravajući se na prostore živućih centara koje definira kao prostore sa sadržajima koji imaju direktnu korist od ekonomije kretanja poput tržnica, ugostiteljstva i trgovačkih ulica [4]. Na tom tragu ovim radom provjeravamo hipotezu da se povijesna središta i najintegriraniji dijelovi suvremenoga grada nužno ne preklapaju. Potvrda navedenog (slika 2) dovodi do zaključka da postoje povijesne i integracijske jezgre u gradovima, a također to dovodi i do dodatnih pitanja kao što su: koja je razlika između gradova u kojima dolazi i u kojima ne dolazi do preklapanja. Gradovi koji se istražuju imaju različite vrste povijesnih jezgri: Beč monocentričnu jezgru na jednoj strani rijeke; Budimpešta policentričnu jezgru s obje strane rijeke; Prag je bicentričan grad s obje strane rijeke; Zagreb je bicentričan grad čija su oba dijela smještena jedan pored drugoga na dva brdašca te udaljeni od rijeke; Ljubljana je monocentričan grad na meandru rijeke s dvorcem na brdu jedne strane i nekadašnjim rimskim gradom na drugoj strani rijeke. Za karte na kojima je bilo moguće izvedene su i aksijalne i segmentne integracijske jezgre, pri čemu je iz analiziranih suvremenih morfologija izdvojeno deset posto najintegriranijih rezultata iz segmentne analize (slika 3., NAIN) i aksijalne (slika 4., Rn *integration* HH).



Slika 4. Aksijalne karte s integracijskom jezgrom (crveno) za Beč, Prag i Zagreb

Povijesni prilazni putovi gradovima su trase duž kojih se grad na različite načine širio. Usporedbom odnosa između povijesnih prilaznih putova i integracijske jezgre provjerava se zajednička karakteristika svih prilaza da su oni povijesno bili poveznica urbane jezgre i neizgrađene periferije, a stupanj procesa preobrazbe iz puta u gradske ulice odvijao im se na različite načine. U usporedbi odnosa između prilaza i integracijske jezgre odabrani su gradovi Beč i Zagreb jer su im karte najusporedivije s obzirom na način njihovog iscrtavanja i mjerilo obuhvata aksijale karte. Kriterij za odabir prilaza za usporedbu bio je specifičnost preobrazbe prilaza, odnosno putovi s prekidima u trasi.

Tablica 2. Usporedba prilaza i integracijske jezgre: n = broj linija; G = grad; I = integracijska jezgra; P = prilazni put; U = preklapanje/unija između integracijske jezgre i prilaznog puta; prilazi 1 = Mariahillfer, 2 = Favoriten, 3 = Petrinjska, 4 = Savska

	Beč				Zagreb			
	aksijalno		segmentno		aksijalno		segmentno	
nG	10539		36959		13236		25026	
nl	1054		3696		1324		2503	
prilazi	1	2	1	2	3	4	3	4
nP	430	306	2847	2157	186	305	683	1163
nU	148	68	980	605	138	205	592	736
nP/nG [%]	4,08	2,9	7,7	5,84	1,41	2,30	2,73	4,65
nU/nP [%]	34,42	22,22	34,42	28,05	74,19	67,21	86,67	63,28
nU/nl [%]	14,04	6,45	26,52	16,37	10,42	15,48	23,65	29,4

3.3 Rasprava

Rezultati usporedbe gradova pokazuju slične dijagrame za promatranih pet srednjoeuropskih gradova u odnosu na preklapljeni dijagram 50 svjetskih gradova. Najveća razlika koja se može uočiti u dijagramu je linija koja pokazuje odnos između srednje i maksimalne vrijednosti za integraciju, pri čemu Ljubljana i Zagreb pokazuju otklon prema nižim vrijednostima u odnosu na Prag, Budimpeštu i Beč. Iz prijeklopa integracijske jezgre i povijesne jezgre vidljivo je da se preklapaju potpuno na primjeru Beča,

koji je monocentričan grad nastao razvojem i širenjem na rimskim slojevima. Sličnu razinu preklapanja pokazuje i Pešta te Ljubljana u kojoj je izuzet dvorac na brežuljku. Na slučaju Zagreba i Praga integracijske jezgre se minimalno preklapaju s povijesnim utvrđenim dijelom jezgre.

Tablična usporedba u postocima preklapanja integracijske jezgre i prilaznih putova potvrđuje da se prilazi značajno razlikuju, što znači da je za tipološku identifikaciju potreban veći uzorak. Postoci i brojke se razlikuju između aksijalne i segmentne analize, ali na oba grada omjer sustava prilaza i ukupnog sustava grada (nP/nG) te udio u kojem prilaz formira integracijsku jezgru (nU/nI) daju u segmentnim analizama više iznose, dok su odstupanja u udjelu u kojem jezgra formira put (nU/nP) manja, a na primjeru Mariahilfer ulice u Beču su iznosi isti. Razlike u postocima potvrđuju i grafičku usporedbu između jezgri koja pokazuje razlike između aksijalne i segmentne integracijske jezgre pri čemu aksijalna definira uži gradski centar, dok segmentna ističe određene ulice i prilaze.

4 Zaključak

Zahvaljujući suvremenim alatima za obradu podataka danas je moguće proučavati razvoj i širenje grada, kao i teme preobrazbi javnog prostora, na jednostavniji i detaljniji način uz provjeru matematičkim vrijednostima za sustave.

Ovim početnim istraživanjima utvrđen je način usporedbe gradova i prilaznih putova i korak je prema definiranju novih kriterija za planiranje razvoja grada na temelju povijesnih slojeva.

Literatura

- [1] Hillier, B.: *Space is the machine*, Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1996.
- [2] Marić, T., Palaiologou, G., Griffiths S., Bojanić Obad Ščitaroci, B.: *Gateway-pathway heritage and urban growth – Zagreb case study*, Proceedings of the 11th International Space Syntax Symposium, ur. Heitor, T., Serra M., Pinelo Silva, J., Bacharel, M., Cannas da Silva L., 90.1-90.15. Lisabon, 2017.
- [3] Hillier, B., Yang, T., Turner, A.: *Normalising least angle choice in Depthmap and how it opens up new perspectives on the global and local analysis of the city space*, Journal of Space Syntax, 3 (2012) 2, pp.155-193. [online publication date: 28 December 2012.] Available at: <http://www.journalofspacesyntax.org/>
- [4] Hillier, B.: *Centrality as a process – accounting for attraction inequalities in deformed grids*, Proceedings of the Space Syntax Second International Symposium, 1 (1999), pp. 06.1-06.20.



ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.

Mobilnost za vrijeme doktorskih studija

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.33>

Engineering doctoral study in Irish Universities: A personal perspective

Paul Cahill

University College Cork, Centre for Marine and Renewable Energy Ireland (MaREI), Environmental Research Institute (ERI), Ireland

kontakt: paul.cahill@ucc.ie

Abstract

Research is increasingly becoming an international endeavour, which are driven through international communication and collaboration. It is therefore necessary to become aware of different national experiences so as to provide a unified international approach. This is particularly true for PhD study. In this regard, this paper outlines engineering doctoral studies in an Irish University. A general outline of the entry requirements is provided, along with requirements during the PhD studies. The personal experience of the author is provided. Finally, a brief overview of the PhD research conducted by the author during his PhD is provided.

Ključne riječi: PhD studies, research, engineering, energy harvesting

Tehnički doktorski studij na irskim sveučilištima: osobno viđenje

Sažetak

Istraživački rad sve češće dobiva obilježje međunarodne aktivnosti, što se potiče kroz rastuću komunikaciju i suradnju na međunarodnoj razini. Zato se trebamo upoznavati s iskustvima u raznim državama kako bi se iz njih mogao izvesti objedinjeni međunarodni pristup. To naročito vrijedi za doktorske studije. S tim u vezi, u ovom se radu ukratko opisuju tehnički doktorski studiji na irskom sveučilištu. Daje se opći prikaz uvjeta za pohađanje studija, isto kao i zahtjevi koji se trebaju ispuniti u toku trajanja studija. Iskazano je i osobno iskustvo autora rada. Na kraju se daje kratak prikaz doktorskih istraživanja koje je autor proveo u toku svog dokorskog studija.

Keywords: doktorski studiji, istraživanje, inženjerstvo, žetva energije

1 Introduction

For entry into a PhD degree programme for engineering within Ireland, students must hold, at a minimum, an accredited undergraduate bachelor's degree relevant to the proposed programme or a Masters degree. The minimum standards that are required from the undergraduate degree for the student to become eligible for admission to the PhD programme is set down by the University, with a common requirement of a minimum grade of Second Class Honours, Grade I being necessary. There are two possible research programmes formats that can be undertaken to pursue a PhD degree in engineering. The first is the Traditional PhD programme, whereby students embark on a minimum of three years of study before they can obtain their PhD. This programme does not require students to complete taught modules as part of their studies, which are optional and it is at the discretion of the students as to whether they choose to undertake such coursework. The second type of programme is the Structured PhD programme. Under this programme, students are required to undertake coursework as part of their studies, with a four-year period of study required before becoming eligible to defend your doctoral thesis.

The two PhD programmes also have different requirements pertaining to supervision. While both require that doctoral study students have a primary supervisor, the Structured PhD programme requires that co-supervisor also be present as part of the mentoring and supervision team. As part of the Traditional PhD programme, co-supervision is allowed but not mandatory.

1.1 Formal assessment of students research output

As part of both PhD programmes of study, students are required to complete an Annual Review at the end of each year of study in order to progress to the following year of study. This review consists of a Panel of Assessors, which consists of an internal evaluator, drawn from the academic faculty within their respective department and an external evaluator, drawn from the academic faculty outside of their department but within the School. For example, a PhD student in the Department of Civil Engineering would be assessed by an internal academic from the Department and an external academic from within the School of Engineering, but from the Department of Electrical Engineering or similar. The Annual Review takes the form of a presentation given by the student, whereby the student presents research conducted in the preceding year, their ongoing research, a detailed plan for the coming year of research and a plan on the focus of their research until the completion of their studies. Following the presentation, the student will be interviewed by the Panel on their presentation and, if deemed satisfactory, will be recommended to continue their studies through advancement into the subsequent year of their programme.

1.2 Duties and responsibilities of PhD students

Within Engineering PhD programmes in Ireland, PhD students may be required to contribute a number of hours to the Department or School within which they are conducting their studies. Within the School of Engineering in University College Cork (UCC), this contribution takes the form of 100 hours per annum to be completed by the student to contribute to the School. A wide range of activities are considered under this contribution, such as providing tutorials or labs to undergraduate students and outreach, such as representing the School at University Open Days, amongst a host of others. Apart from this contribution, all other time is allocated to the research activities of the student, with students not obliged to provide any other teaching aside from this contribution of time.

1.3 Funding opportunities

Within Ireland, there are many funding options which students can apply for to fund their PhD studies. Oftentimes, supervisors have funding through which to support their students. In Ireland, large scale funding is provided nationally in science and engineering through Science Foundation Ireland (SFI), a state-funded funding agency and internationally, through European funded bodies, under programmes such as Horizon 2020. Individual funding is also available, with the state run Irish Research Council providing funding for individual students through the Government of Ireland Postgraduate Scholarship Scheme, which covers tuition fees, a small expense budget for the student and a living stipend for between one and four years, depending on the stage of study the recipient is at.

1.4 Awarding of PhD degree

Upon the completion of the both the Traditional and Structured PhD programmes, students undergo an oral defence of their doctoral thesis, the PhD Viva, in order to be awarded their PhD degree. An examination panel is formed for each Viva, consisting of an internal and external assessor. The internal assessor is drawn from the academic faculty of the Department or School and an expert in the field of the students' research drawn from an external university. As part of the Viva process, there may be an option for the student to first provide a presentation to the examination board as a means of providing an overview of the completed research before completing an oral examination. Each Department within the University has regulations relating to this presentation, with it being either mandatory to provide such a presentation or at the students' discretion. Following the Viva examination, there are six possible results, namely:

1. Award – As is, with no corrections to the thesis required.
2. Award – Minor corrections to the thesis required.
3. Award – Major corrections to the thesis required for the PhD is awarded.
4. Reject – With permission to submit a significantly revised thesis to be considered in a second oral defence.
5. Reject – With the awarding of a Masters Degree in place of a Doctoral Degree.
6. Reject – No degree is awarded.

2 Personal experiences during an engineering PhD programme

In 2011, I obtained a Bachelor of Engineering Degree (Honours) from the Department of Civil and Environmental Engineering, UCC. As part of this degree, students are required to undertake a Final Year Project through research and it was this module where I was first introduced to research. The topic of the project was an investigation into the placing of concrete onto precast arch structures which are employed nowadays when constructing arch bridges. The central research question was to determine the effects that lateral pressure, exerted by concrete before hardening, can have on the precast structures [1]. Following this, I chose to remain in UCC and pursue further research opportunities, in the form of a Masters Degree by research. My primary supervisor for this Degree was Dr Vikram Pakrashi, Lecturer in Structural Engineering within UCC, who had also previously been my supervisor for the Final Year Project and had introduced me to research, along with Dr Alan Mathewson, of Tyndall National Institute, who was my co-supervisor.

The Masters Degree was intended to be a one year programme, conducted solely through research and commencing in October 2011. After six months of study, I had made the decision to pursue a PhD and therefore applied to transfer to a Traditional PhD programme. The result of my application was that, in lieu of an Annual Review at the end of this year of study, I completed a Transfer to PhD Assessment. The format of this assessment was in keeping with the Annual Review and the recommendation from the Panel was for my transfer to a PhD programme. This resulted in my original year being regarded as Year 1 of my PhD and not, as was originally intended, as the 12-month Masters Degree. Following from this Year 1, I continued in my PhD programme and completed two Annual Reviews, at the end of my second and third years of study, before completing my Thesis Defence at the end of Year 4 in 2015. I found these Annual Reviews to be beneficial to my research as it provided a forum for critical assessment of my completed and proposed research from accomplished researchers who were not intimately associated with my work. These occasions enabled me to refine not only my communications skills, but also the direction and substance of my research work.

The funding of my PhD studies came from three different sources. For the second year of my PhD, I applied for and was awarded The John Sisk Postgraduate Research Scho-

larship in Civil Engineering 2012/ 2013, a funding scheme which is managed by the School of Engineering in UCC. For my third year, I was awarded a Scholarship under the Irish Research Council Government of Ireland Postgraduate Scholarship Scheme 2013/2014 and for my fourth and final year, I received funding through a research project of my co-supervisor, award to him from SFI. All three awards covered my tuition fees, provided me with a small expense budget and a stipend.

At the end of my studies, I underwent my PhD Viva in December 2015, one month following the submission of written thesis. As my assessment board, I had an internal assessor from the School of Engineering, Dr. Denis Kelliher, a lecturer in Structural Engineering, and as external Prof Giuseppe Marano, from the Technical University of Bari, Italy. As part of the process, I chose to provide a short presentation, of 15 minutes in duration, to the board. The aim of the presentation was to provide them with my insight verbally into the central research topic of my thesis, the reasons for the structure and provide general overviews on my work. Following the oral interview, I was awarded my PhD with minor corrections required to the written thesis. I submitted these corrections in a final, amended written thesis in January 2016, and finally graduated in June 2016.

3 Overview of PhD research

The central research question that I addressed in my PhD thesis was the feasibility of using energy harvesting technology integrated with civil infrastructure systems and associated applications. Vibration based energy harvesting technology utilises the dynamic response of the host structure to which it has been applied as the base excitation for the conversion of kinetic energy into electrical energy [2]. Therefore, through the integration of such technology with a structure, the generated voltage output from the harvester will contain signatures of both the harvester and the structure and can be utilised for applications ranging from energy harvesting, structural health monitoring (SHM) [3] and as indicators for control. The overarching goal of investigating and combining these three applications formed my research topic, as illustrated in Figure 1.

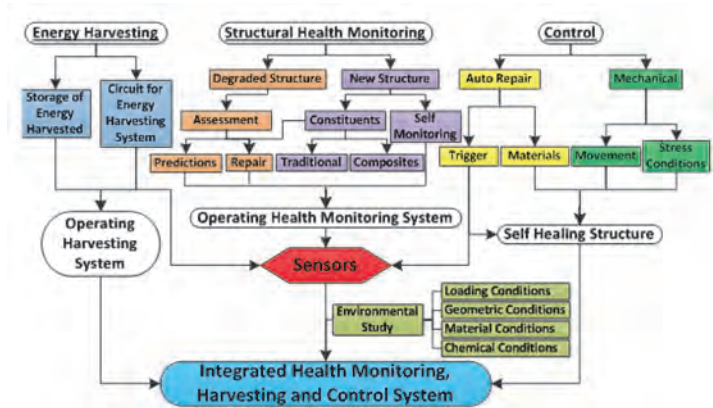


Figure 1. Research goals and objectives for PhD research studies.

To prove the applications that can arise from energy harvesting technology integration with civil infrastructure, I adopted four major research themes. Firstly, I investigated theoretically applications that arise from train-bridge interaction, both in terms of the amount of energy which may be harvested and SHM applications that can arise from the deployment of such technology [4]. Secondly, I investigated the use of a laboratory procedure for the validation of energy harvesting devices using theoretical and measured acceleration datasets of civil infrastructure. Thirdly, through the use of scaled laboratory experiments, the physical interaction between the device and the infrastructure system can be validated [5] and finally, the full scale deployment of novel harvesting devices with a full scale bridge structure was successfully achieved. The laboratory experiments were completed within the experimental laboratory of the Dynamical Systems and Risk Laboratory (DSRL), which I assembled and ran during the course of my studies (Figure 2).



Figure 2. Experimental laboratory as part of the Dynamical Systems and Risk Laboratory (DSRL), UCC.

4 Research visits

Some of the most defining moments of my research during my PhD were due to research visits I undertook to different universities around the globe. I applied or accepted any opportunity to visit different research groups, so as to enhance my collaborations, knowledge, and exposure to different research approaches and philosophies. I visited the Indian Institute of Technology – Madras (IIT-Madras), India; Rice University, USA and KTH Royal Institute of Technology, Sweden. The visits I undertook were generally four weeks in duration and had a defined scope of research which would be undertaken during my stay. As a result, each of the three visits I undertook have resulted in a journal publication, either published or under review and I have established working collaborations with many groups which I would otherwise have not had the opportunity to work alongside.

5 Conclusions

This paper provides an overview of PhD studies in engineering from an Irish perspective. In this regard, a general outline of PhD formats and requirements within Ireland is outlined, including an overview on the general entry requirements, the responsibilities of the doctoral researcher, common funding opportunities and finally, the examination and awarding of the PhD Degree. The personal experiences of the author arising from his time as a PhD student in Ireland is provided, as is a brief overview of his research topic and work completed as part of his studies. Finally, research visits undertaken by the author during his PhD are outlined and the importance of such visits emphasised.

References

- [1] Cahill, P., Allen, E., Pakrashi, V., O'Connor, A.: Horizontal loading effects of fresh concrete on precast arches, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, 18 (2013) 8, pp. 779 - 789.
- [2] Beeby, S. P., Tudor, M.J., White, N.M.: Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technology*, 17 (2006) 12, pp. R175–R195.
- [3] Cahill, P., Jaksic, V., Keane, J., O'Sullivan, A., Mathewson, A., Ali, S.F., Pakrashi, V.: Effect of road surface, vehicle and device characteristics on energy harvesting from bridge – vehicle interactions, *Computer – Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31 (2016) 12, pp. 921-935
- [4] Cahill, P., Ni Nullain, N.A., Jackson, N., Mathewson, A., Karoumi, R., Pakrashi, V.: Energy harvesting from train-induced response in bridges, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, 19 (2014) 9, 04014034 (11pp).

- [5] Cahill, P., O'Keeffe, R., Jackson, N., Mathewson, A., Pakrashi, V.: Structural health monitoring of reinforced concrete beam using piezoelectric energy harvesting system, In: Proceedings of the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), Jul. 8th – 11th, Nantes, France, 2014.

GRAĐEVINAR

Časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera

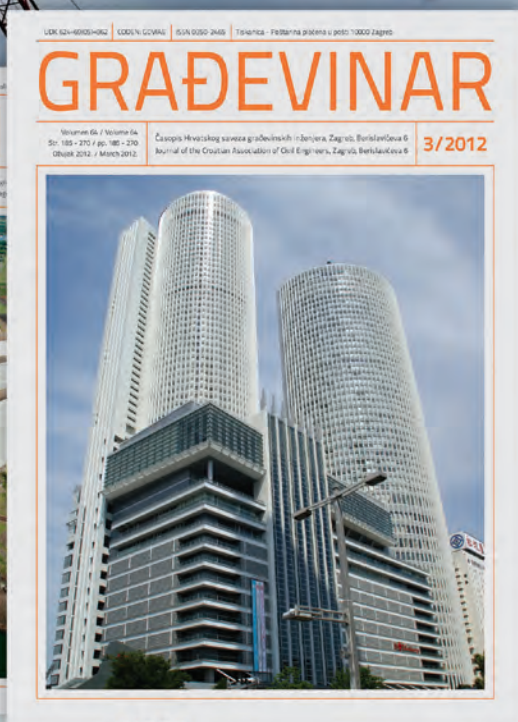
- Znanstveno-stručni članci
- Stručno-informativni prilozi

Časopis redovito izlazi 12 puta godišnje od 1949. godine

Citiranost:
Science Citation Index Expanded

Radovi se tiskaju na hrvatskom jeziku, a od broja 1/2012 svi radovi u on-line izdanju su u cijelosti na hrvatskom i engleskom jeziku

Najveći znanstveno-stručni časopis iz građevinarstva u Hrvatskoj



Adresa uredništva:
Berislavićeva 6, Zagreb, Croatia

tel: +385 1 4872-502
fax: +385 1 4872-526

e-mail: gradjevinar@hsgi.org
www.hsgi.org/gradjevinar

GRAĐEVINAR

Journal of the Croatian Association of Civil Engineers

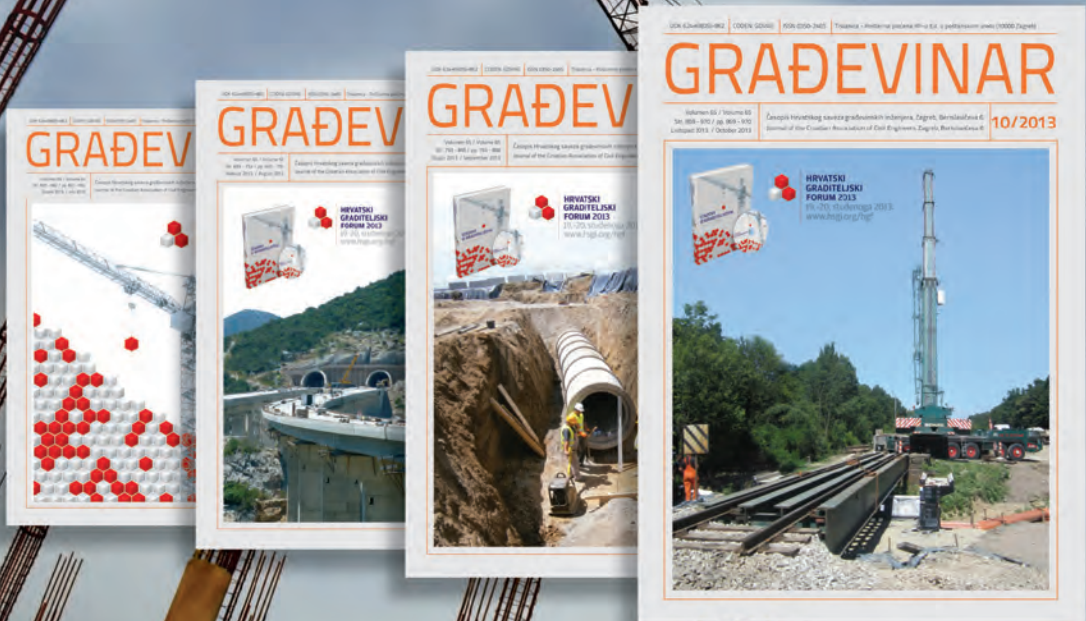
- Scientific and Professional Papers
- Professional news items

Abstracted/Indexed in:
Science Citation Index Expanded

The journal is published regularly
12 times a year since 1949.

Papers are published in Croatian
language and, as of the first issue
of GRAĐEVINAR for 2012, all papers
in the online edition are entirely in
Croatian and English

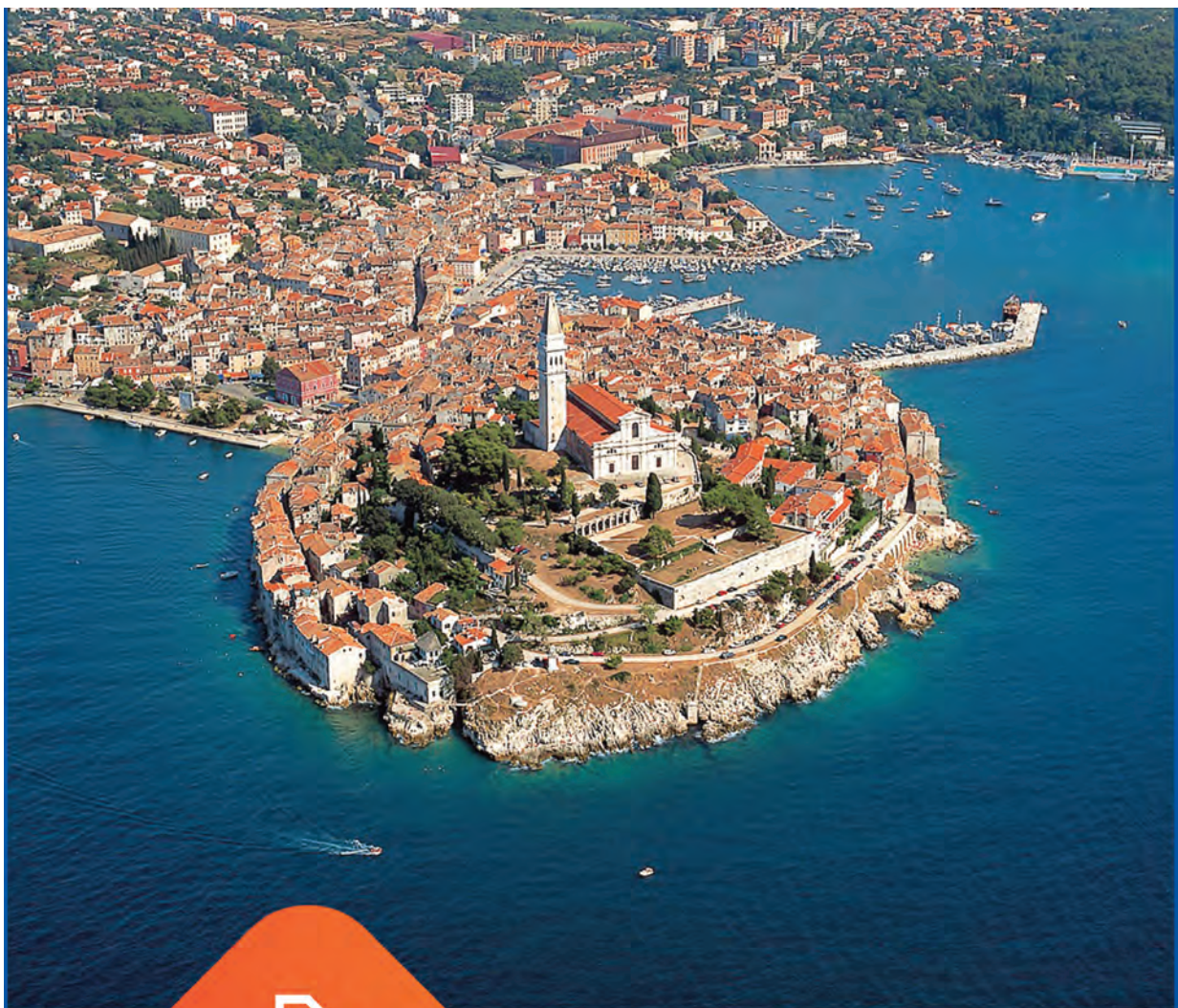
The biggest scientific & professional
journal of civil engineering in Croatia



Editorial Board address:
Berislavićeva 6, Zagreb, Croatia

phone: +385 1 4872-502
fax: +385 1 4872-526

e-mail: gradjevinar@hsgi.org
www.hsgi.org/gradjevinar



RILEM SPRING CONVENTION
and CONFERENCE

**SUSTAINABLE MATERIALS,
SYSTEMS AND STRUCTURES**

SMSS 2019

Lone Hotel, Rovinj, Croatia
18 – 22 March 2019



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING





SMSS 2019

SUSTAINABLE MATERIALS,
SYSTEMS AND STRUCTURES

Lone Hotel, Rovinj, Croatia
18 – 22 March 2019

grad.hr/rilem.smss/
rilem.smss@grad.hr

SMSS 2019 conference is organised as a supporting event of RILEM Spring Convention. The scope of the conference is to gather scientist, practitioners, members of technical committees and users of technical recommendations, to jointly at the same place discuss and envision the future sustainable development of materials, systems and structures in a holistic, global way.

Honorary President of Scientific Committee

Professor Emerita Dubravka Bjegović, RILEM Fellow Member

SEGMENTS (MINI SYMPOSIUMS)

- 1. NEW GENERATION OF CONSTRUCTION MATERIALS**
Chairs: Marijana Serdar, Nina Štirmer, John Provis
- 2. ENERGY EFFICIENT BUILDING DESIGN AND LEGISLATION**
Chairs: Marina Bagarić, Ivana Banjad Pečur, Hartwig M. Künzel
- 3. MAINTENANCE AND REPAIR OF STRUCTURES**
Chairs: Ana Baričević, Marija Jelčić Rukavina, Domagoj Damjanović, Maurizio Guadagnini
- 4. CHALLENGES IN DESIGN AND MANAGEMENT OF STRUCTURES**
Chairs: Ana Mandić Ivanković, Marija Kušter Marić, Alfred Strauss, Tomislav Kišiček
- 5. NOVEL METHODS FOR CHARACTERIZATION OF MATERIALS AND STRUCTURES**
Chairs: Ivan Gabrijel, Marijan Skazlić, Christian Grosse
- 6. PhD SYMPOSIUM**
Chairs: Martina Pezer, Dirk Schlicke, Stjepan Lakušić

For more information visit <http://grad.hr/rilem.smss/>



DOI 10.5592/CO/ZT.2017

ISBN 978-953-8168-19-2

