

Zajednički temelji 2021.

Osmi skup mladih istraživača iz područja
građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti

Mostar, 23.–24. rujna 2021.

ZBORNİK RADOVA



UDRUGA
HRVATSKIH
GRAĐEVINSKIH
FAKULTETA

Zajednički temelji 2021.

Organizatori Skupa

Udruga hrvatskih građevinskih fakulteta
Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Izdavač

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
Sveučilište u Mostaru Građevinski fakultet
Udruga hrvatskih građevinskih fakulteta

Urednik

mr. sc. Anton Vrdoljak

Dizajn logotipa

Božo Penavić, prof. fizike

Dizajn naslovnice

mr. sc. Anton Vrdoljak

Lektura

Marija Vukoja Mikulić, prof.

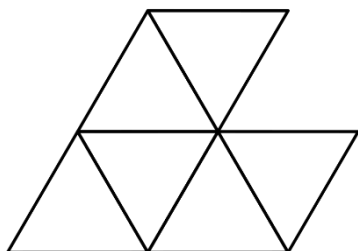
ISBN 978-953-8168-52-9

DOI <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021>

Zagreb, rujan 2021.

Iako su poduzete sve mjere kako bi se sačuvao 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 Mostaru, Ustrojbena jedinica Građevinski fakultet



Zajednički temelji 2021.

Osmi skup mladih istraživača iz područja
građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti

ZBORNİK RADOVA

23.–24. rujna 2021., Mostar

Predsjedništvo organizacijskog odbora

dr. sc. Ante Džolan

mr. sc. Anton Vrdoljak

Članovi organizacijskog odbora

Stanko Čolak

Marino Jurišić

Ana Majstorović

Petra Merdžo

Moderatori sekcija

Stanko Čolak

Marino Jurišić

Ana Majstorović

Petra Merdžo

Anton Vrdoljak

PREDGOVOR

Zajednički temelji su redoviti skup mladih istraživača (doktoranada i poslijedoktoranada) iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti. Ideja o kreiranju ovakvog skupa je došla sa sastanka Udruge hrvatskih građevinskih fakulteta (UHGF) u veljači 2013. Udruga je ujedno i kontinuirani organizator i sponzor ovog događanja s obzirom na to da su Zajednički temelji u skladu s mnogim od ciljeva same Udruge a koji uključuju: poticanje znanstvenog 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.

Tako je prvi skup održan na Fakultetu građevinarstva arhitekture i geodezije u Splitu u rujnu 2013., koji je polučio adekvatan uspjeh i pozitivne komentare, te predao štafetu Rijeci. Građevinski fakultet u Rijeci i njihov tim mladih istraživača su 2014. napravili izvanredan posao i nastavili u duhu temelja graditi dalje. Iako van granica Hrvatske, tim Građevinskog fakulteta u Mostaru je entuzijastično nastavio skup u rujnu 2015., ovaj put kreirajući i pripadajuću web stranicu <https://www2008.gf.sum.ba/zajednicki-temelji/>. Potom je Građevinski fakultet Osijek spremno preuzeo posao te u rujnu 2016. organizirao četvrti po redu skup, gdje su sudionici imali priliku za obilazak tada potpuno nove i vrlo impresivne zgrade fakulteta. I kao šećer na kraju, peti skup je održan u glavnom gradu, Zagrebu, gdje je organizacijski tim mladih istraživača napravio izvanredan posao kao što se može vidjeti na pripadajućim web stranicama <http://www.grad.hr/zt2017/>.

Održavanjem Skupa u Zagrebu zatvoren je prvi krug Zajedničkih temelja, te je 2018. godina, iako krug nema ni početka ni kraja, povratak na početak. Naime, 6. Skup je održan ponovno u Splitu. Međutim, organizacija 1. Skupa, te sudjelovanje na ostalima Splitsanima je poslužio kao skupljanje iskustva kako bi organizacijom 6. Skupa postavili nove standarde u organizaciji, što se može vidjeti i s web stranice <http://zt2018.org/>. Splitsani ponovno palicu predaju Riječanima, koji organiziraju 7. Zajedničke temelje 2019. Zadnji „staro normalno“ Temelji (<https://zt2019.uniri.hr/>), kao najmlađi, predstavljaju vrhunac u sedmogodišnjoj povijesti održavanja Skupa. Nakon Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, čast organizacije Temelja 2020. godine ponovno dolazi u ruke Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru. Nažalost više nema starog normalnog pa 2020. godine Skup nije održan. Kako Zajednički temelji ne bi postali žrtvom pandemije COVID-19, te kako bi njihov duh nastavio živjeti, ove 2021. godine u organizaciji Udruge hrvatskih građevinskih fakulteta i Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru održat će se 8. Zajednički temelji - ZT2021, koji će se prvi put održati na način novog normalnog – online. Nadamo se da ćemo se brzo vratiti uobičajenom načinu održavanja Temelja, odnosno da će već idući, 9. Zajednički temelji ponovno zauzeti svoje mjesto u prostorijama osječkog Građevinskog fakulteta.

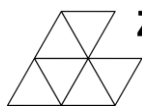
Predsjednik organizacijskog odbora

Ante Džolan

SADRŽAJ

Predgovor	5
Monitoring procesa građenja primjenom digitalne tehnologije prepoznavanja objekata	
Begić H.	9
Pregled numeričkih metoda za modeliranje armiranobetonskih konstrukcija	
Čarija J., Nikolić M., Nikolić Ž.	15
Solarne elektrane i unutarnja hidroenergija vodoopskrbnih sustava – moguće rješenje održivosti	
Džeba T.	21
Finite element model updating methods for structural application	
Ereiz S., Duvnjak I., Jiménez-Alonso J. F.	27
Pregled metoda za praćenje lokalnoga podlokavanja uz stupove mosta	
Fliszar R., Gilja G.	33
Laboratorijska ispitivanja kolosiječnoga pribora	
Ivančev M., Haladin I.	39
Postavljanje opreme za monitoring na mostu Vranduk 1	
Jurišić M., Markić R.	45
Primjena diferencijalne geometrije u parametarskom modeliranju ljuskastih struktura u Grasshopperu	
Koncul N.	51
Kriteriji za projektiranje otvorenih prostora škola	
Krajnović M., Roth-Čerina M., Lončar-Vicković S.	55
Djelovanje eksplozije na stupove nadvožnjaka	
Lukić S., Draganić H.	61
Analiza polumjera putanje vozila u horizontalnim krivinama izvangradskih dvotračnih cesta	
Maljković B., Cvitanić D.	67

Modeliranje prodora morske vode u obalni vodonosnik rijeke Neretve	
Matić I., Srzić V.	73
Identificiranje promjena u arhitektonskome projektiranju i urbanizmu uzrokovanih električnim avionima	
Pavić S.	79
Koeficijent toplinske provodljivosti tradicijske zemljane kuće iz istočne Hrvatske: studija slučaja	
Perić A., Kraus I., Krstić H.	85
Teorijska analiza savijanja betonskih greda s ovijenim tlačnim područjem	
Renić T., Kišiček T.	91
Pregled zidanih svođenih mostova u Republici Hrvatskoj	
Trajber D., Penava D., Rinaudo F., Sarhosis V., Abrahamczyk L..	97
Sinergija crvenoga mulja, letećega pepela i vapnenca u cementnim vezivima	
Vladić Kancir I., Serdar M.	103
Utjecaj ugljičnih nanocjevčica na svojstva betona	
Vrdoljak I., Miličević I.	109
Identifikacija hidrogeološkoga režima Crvenoga jezera analizom glavne recesijske krivulje	
Vrsalović A., Andrić I., Bonacci O.	115
RubSuPave – mogućnost primjene reciklirane gume u cementom stabiliziranim nosivim slojevima kolnika	
Zvonarić M.	121



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.01>

MONITORING PROCESA GRAĐENJA PRIMJENOM DIGITALNE TEHNOLOGIJE PREPOZNAVANJA OBJEKATA

CONSTRUCTION PROCESS MONITORING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE OBJECT DETECTION

Hana Begić¹

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, hbegic@gfos.hr

Sažetak

U radu je prikazan monitoring procesa građenja, primjeri njegove automatizacije te primjeri primjene digitalne tehnologije prepoznavanja objekata pri monitoringu građenja. S obzirom na to da građevinsku industriju obično karakteriziraju niska produktivnost, premašivanje troškova, vremenskih rokova te pojavljivanje neočekivanih problema, može se reći kako je pravovremen monitoring ključan za uspješnost projekta. Kvalitetnim monitoringom moguće je uspješnije planiranje troškova, rokova i resursa te je moguće podatke iz prethodnih projekata upotrijebiti u sličnim novim projektima za poboljšane planove. Pojavom novih tehnologija dolazi do automatizacije monitoringa čija primjena omogućuje smanjenje troškova, trajanje projekta te detaljno prikupljanje podataka o postojećim građevinama. Osim automatizacije monitoringa procesa građenja, moguća je i automatizacija ažuriranja planova u tijeku građenja čime se kontinuirano mogu pratiti napredak odnosno izvršenje pojedinoga elementa i cijele građevine te pomoci planiranih rokova. Digitalna tehnologija prepoznavanja objekata našla je svoju primjenu u monitoringu procesa građenja te pokazala bitna poboljšanja u aspektima povećanja učinkovitosti, kvalitete i sigurnosti u projektu.

Ključne riječi: monitoring građenja, prepoznavanje objekata, automatizacija monitoringa

Abstract

This paper presents the monitoring of the construction process, examples of its automation and examples of the application of digital object recognition technology in construction monitoring. Given that the construction industry is usually characterized by low productivity, cost overruns, missing deadlines and the emergence of unexpected problems, it can be said that timely monitoring is the key to project success. With quality monitoring, it is possible to plan costs, deadlines and resources more successfully, and use data from previous projects in similar new for improved plans. The emergence of new technologies leads to the automation of monitoring, the application of which enables the reduction of costs, project duration and detailed collection of data on existing buildings. In addition to automating the monitoring of the construction process, it is also possible to automate the updating of plans during construction, which enables continuous monitoring of the progress or execution of each element and the entire building with the shift of

planned deadlines. Digital object recognition technology has found its application in monitoring the construction process and has shown significant improvements in terms of increasing efficiency, quality and safety in the project.

Keywords: construction process monitoring, object detection, automation of monitoring

1. Uvod

Pravovremenim i kvalitetnim monitoringom moguće je uspješnije planiranje troškova, rokova i resursa. Razvitkom digitalnih tehnologija dolazi do automatizacije monitoringa koja omogućava proaktivni monitoring odnosno smanjenje troškova projekta, njegovo trajanje te detaljno prikupljanje podataka o prethodnim projektima. S obzirom na važnost faze planiranja projekta, razvija se i automatizacija ažuriranja planova čime se kontinuirano može pratiti napredak odnosno izvršenje projekta te eventualni pomaci planiranih rokova. U ovome poglavlju prikazani su monitoring građevinskoga projekta, primjeri njegove automatizacije te primjeri automatizacije ažuriranja planova.

1.1. Monitoring građevinskoga projekta

Građevinsku industriju obično karakteriziraju niska produktivnost, premašivanje troškova, vremenskih rokova te pojavljivanje neočekivanih problema. Osim toga svaki je građevinski projekt jedinstven, stoga svaki zahtijeva i specifičan pristup. To se odnosi i na monitoring odnosno praćenje gradilišta i napretka građevinskoga projekta. Zato je već u početku planiranja pojedinoga projekta potrebno voditi računa o vrsti monitoringa te o zahtjevima koji se za njega postavljaju (1). Osim jedinstvenosti projekta brojni su razlozi zašto je faza planiranja od kritičnoga značaja u projektu, kao što su planiranje troškova, rokova, resursa te ostaloga što će pružiti podlogu za kvalitetan monitoring projekta. Iz navedenih razloga potrebno je već pri izradi projekta odlučiti o mjerljivim veličinama koje će se pomoću monitoringa uspoređivati, odnosno pomoću kojih će se početno stanje usporediti s trenutačnim ili konačnim stanjem, čime će se utvrditi razina izvršenosti projekta ili njegova pojedinog projekta. Može se reći kako je pravovremen monitoring ključan za uspješnost projekta jer omogućava utvrđivanje svih odstupanja od plana uz potencijalne probleme, a ostaje dovoljno vremena za pronalazak prikladna rješenja (2). Što je više vremena potrebno za utvrđivanje odstupanja od plana, to korektivne mjere postaju skuplje i kompleksnije, a potencijalna se šteta za projekt povećava. Zbog toga se praćenje napretka projekta smatra jednim od najvećih izazova s kojima se voditelj gradilišta susreće s obzirom na kompleksnost ciljeva te veze među aktivnostima (3). Osim što se monitoringom utvrđuje stanje trenutačnoga projekta, podatci prikupljeni monitoringom mogu se koristiti i za buduće projekte, čime se postiže uspješnije planiranje troškova, rokova i alokacije resursa (4). S obzirom na to da su tradicionalne tehnike monitoringa skupe i dugotrajne, nisu u velikoj mjeri zastupljene u tvrtkama te time posljedično nedostaje i podataka iz prethodnih projekata na kojima bi se temeljili novi, poboljšani planovi za buduće projekte. Također, tradicionalnim monitoringom nije moguće prikupiti i analizirati podatke tijekom jednoga radnog dana, nego su dostupni na dnevnoj ili tjednoj bazi izvješća nakon analize kada je često već kasno za poduzimanje pravovremenih korektivnih mjera. Zbog navedenih nedostataka tradicionalnoga monitoringa posljednjih godina dolazi do razvitka digitalnih tehnika praćenja projekta što je omogućeno razvitkom informacijskih i komunikacijskih tehnologija (3), primjerice *time-lapse* fotografija, pametne kamere, 3D laserskoga skeniranje, fotogrametrija, RFID (*radio-frequency identification*) tehnologija i slično.

Prema (5) najekonomičniji način za mjerenje napretka projekta jest automatizacija kontrole projekta, što osim automatizacije ocjene napretka podrazumijeva i automatizaciju planiranja aktivnosti, resursa, strukture projekta i odgovornosti tijekom svih faza građevinskoga projekta.

1.2. Automatizacija monitoringa

Automatizacija monitoringa građevinskoga projekta započela je nešto kasnije nego automatizacije ostalih faza životnoga ciklusa projekta. Okvirnim početkom može se smatrati 2002. godina kada je započeo rad na automatizaciji komunikacijskoga sustava za olakšanu razmjenu informacija među članovima projekta (6). Rezultati istraživanja pokazali su smanjenje radnoga vremena, točnije skraćeno potrebnoga vremena za distribuciju nacрта projekta relevantnim podizvođačima više od 90 %, što je posljedično generiralo i bitno smanjenje troškova. Važan čimbenik koji se može automatizirano mjeriti s obzirom na izvedbu projekta jest rad radnika s idejom mjerenja njihove lokacije primjenom automatiziranoga prikupljanja podataka (*automated data collection* – ADC) i integrirati ga s modelom projekta zgrade (*building project model* – BPM), pri čemu BPM sadrži informacije o geometriji zgrade, resursima dodijeljenim određenim aktivnostima i planiranome rasporedu (7). Dobar je primjer i automatizirani računalni sustav praćenja u stvarnome vremenu nazvan PHOTO-NET II gdje su *time-lapse* fotografije zabilježene pomoću kamera na gradilištu te se kasnije koriste za usporedbu planiranoga i izvršenoga stanja (8). Osim praćenja napretka projekta, zabilježen je i primjer automatiziranoga praćenja nesigurnih aktivnosti u projektu kojim se utvrđuju opasne lokacije na gradilištu te daju upozorenja i predlažu zaštitne mjere (9). Nadalje, razvijen je i automatizirani sustav za lokalizaciju materijala pomoću RFID tehnologije (10). S razvitkom senzora za prikupljanje podataka, razvijeno je i nekoliko metoda prikupljanja podataka s gradilišta prikazanih u (11–13). U današnje je vrijeme pomoću bespilotnih letjelica (14) moguće i prikupljanje detaljnih podataka o konstrukciji kao što su konstrukcijski elementi građevine, volumen betona, detekcija pukotina i slično, a moguća je čak i integracija bespilotne letjelice s bespilotnim vozilom (15).

1.3. Automatizacija ažuriranja planova u tijeku građenja

Potreba za automatizacijom ažuriranja planova prikazana je 2005. godine u radu (16) u kojem je na primjeru gradilišta autoceste prikazana potreba za snimanjem, prenošenjem i spremanjem podataka u svezi s gradilištem za procjenu statusa odnosno izvršenosti projekta. Prilikom studije uočeno je kako se najveći problemi javljaju u svezi sa zabilježavanjem kvantitativnih podataka i to posebice onih koji zahtijevaju izmjere ili izračune. Unatoč potrebi, pokušaji automatizacije ažuriranja pojavljuju se godinama kasnije te je u 2012. godini predstavljen sustav za automatizaciju praćenja napretka građenja koji spaja 4D modeliranje i lasersko skeniranje s podacima prikupljenim na gradilištu (17). Dotadašnje metode ažuriranja temeljile su se na ručnome unošenju podataka u plan, što je u velikoj mjeri prisutno i danas. U radu (18) je predstavljen sustav za automatizaciju ažuriranja planova pomoću podataka iz 4D BIM modela kombiniranih s 3D oblakom točaka snimljenim na gradilištu te je sustav testiran na jednostavnoj betonskoj građevini, a sličan je primjer prikazan i u radu (19). 4D BIM model korišten je i u radu (20) u kojem su podatci o napretku elemenata inkorporirani u BIM model te su elementi obojeni ovisno o njihovu očekivanom i stvarnom napretku. Također su ažurirana i trajanja aktivnosti te datumi završetka aktivnosti.

2. Digitalna tehnologija prepoznavanja objekata

Posljednjih godina počinju se istraživati mogućnosti primjene umjetne inteligencije u monitoringu građevinskoga projekta te se pojavljuju i prvi primjeri njezine primjene. Integracija umjetne inteligencije s tradicionalnim tehnikama monitoringa može pridonijeti povećanju učinkovitosti, uštedi i sigurnosti u projektu. U ovome radu naglasak je na tehnologiji prepoznavanja objekata te njezinoj primjeni u monitoringu projekta, stoga će se u ovome poglavlju promatrati dostupni modeli za prepoznavanje objekata te primjena prepoznavanja objekata u građevinarstvu.

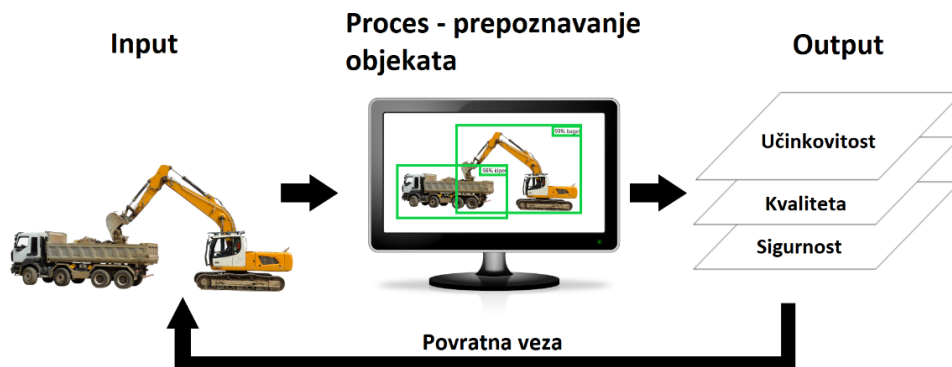
2.1. Dostupni modeli za prepoznavanje objekata

Digitalna tehnologija prepoznavanja objekata posljednjih je godina privukla veliku pozornost s obzirom na široke mogućnosti primjene u sigurnosnome nadzoru, autonomnoj vožnji, analizi snimaka drona, robotskome vidu te raznim oblicima monitoringa. Zbog toga je prepoznavanje objekata tema akademskih i svakodnevnih istraživanja. Može se reći kako je prepoznavanje objekata digitalnom tehnologijom u svezi s računalnim vidom i procesiranjem fotografija koje se bavi prepoznavanjem objekata određene klase iz slike ili videa kao što su ljudi, životinje, predmeti i slično (16). Ta se tehnologija počela osobito intenzivno razvijati pojavom dubokih neuronskih mreža (*deep neural networks*) te dubokoga učenja (*deep learning*) jer oni omogućavaju automatizirano učenje raznih značajki. Trenutačno se modeli korišteni za prepoznavanje objekata na temelju dubokoga učenja mogu podijeliti na modele temeljene na područjima (regijama) i modele temeljene na regresiji (17). Modeli temeljeni na područjima (regijama) istovremeno prepoznaju granice objekata i ocjenu točnosti objekta, dok modeli temeljeni na regresiji dijele kartu značajki koristeći određena pravila i uspostavljaju odnose između predviđenih graničnih okvira, zadanih graničnih okvira i temeljnih podataka za učenje. Primjeri modela temeljenih na područjima (regijama) su modeli *R-CNN* (*Regions with CNN*), *SPP-net* (*Spatial Pyramid Pooling Networks*), *Fast R-CNN*, *Faster R-CNN* i *R-FCN* (*Region-based Fully Convolutional Networks*), dok su primjeri modela temeljenih na regresiji modeli *YOLO* (*You Only Look Once*) i *SSD* (*Single Shot Multibox Detector*) te su oni obično djelotvorniji prilikom prepoznavanja u stvarnome vremenu.

2.2. Primjena prepoznavanja objekata u građevinarstvu

Digitalna tehnologija prepoznavanja objekata našla je svoju primjenu i u mnogim segmentima građevinarstva. U radu (18) je prikazana metoda temeljena na dubokome učenju gdje se algoritmima prepoznaju lica radnika na gradilištu radi provjere njihove certificiranosti za obavljanje određenoga posla, čime se bitno povećava sigurnost na gradilištu. S obzirom na to da su kacige vrlo važan čimbenik u sigurnosti radnika na gradilištu, a velik broj radnika često ih zanemaruje, u radu (19) je predstavljena *Faster R-CNN* metoda za detektiranje kaciga. Korišteno je više od stotinu tisuća nasumično odabranih fotografija radnika s nadzornih kamera 25 različitih gradilišta koje su se prikupljale više od godinu dana. Vrlo sličan primjer prikazan je u radu (20) gdje je predstavljen sustav temeljen na konvolucijskim neuronskim mrežama za automatski monitoring nošenja zaštitnih kaciga te identificiranja pripadajućih boja. U radu (21) je predstavljena metoda prepoznavanja zaštitnih prsluka i zaštitnih kaciga radnika, dok je u radu (22) predstavljena metoda praćenja kretanja više radnika odjednom na gradilištu s mogućnošću predviđanja njihova kretanja. Osim prepoznavanja i praćenja radnika

razvijena je i metoda prepoznavanja strojeva na gradilištu pomoću SSD modela (23). Kao bitni primjeri u građevinarstvu mogu se još navesti i prepoznavanje konstrukcijskih dijelova pomoću metode dubokoga učenja (24) te digitalna tehnologija prepoznavanja oštećenja kolnika (25). Na Slici 1 prikazan je proces digitalne tehnologije prepoznavanja objekata. *Input* je snimka gradilišta odnosno to su strojevi ili elementi na gradilištu, zatim slijedi obrada podataka odnosno prepoznavanje objekata te naposljetku *output* odnosno povećanje učinkovitosti, kvalitete i sigurnosti u projektu.



Slika 1. Prikaz procesa digitalne tehnologije prepoznavanja objekata

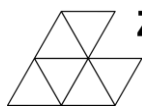
3. Zaključak

Monitoring je neophodan korak u životnome ciklusu svakoga građevinskog projekta. Pravovremenim i kvalitetnim monitoringom povećava se sigurnost na gradilištu, poboljšava se učinkovitost, omogućuje se pravovremeno rješavanje problema te se često smanjuju troškovi i trajanje projekta. Nove tehnologije omogućile su automatizaciju monitoringa gradilišta čime se smanjuje potreba odlaska inženjera na gradilište, a u pojedinim slučajevima omogućava se i automatizirano djelovanje sustava u svezi s problemima na gradilištu. Osim automatizacije samoga monitoringa, novim je tehnologijama omogućeno i automatizirano ažuriranje vremenskih planova, čime se povećava kvaliteta samoga projekta te su u svakome trenutku dostupni ažurirani podaci o stanju izvršenosti pojedinih elemenata i planiranome roku završetka projekta. Primjenom tehnike prepoznavanja objekata pri monitoringu gradilišta povećava se kvaliteta samoga monitoringa te je sustav sve više samostalan i automatiziran. Tako je moguće bitno povećanje učinkovitosti projekta i aspekata sigurnosti i kvalitete.

Literatura

- [1] Orešković M. Monitoring graditeljskog projekta. *Građevinar*. 2019;71(11.):965-73.
- [2] J Skibniewski M. Construction Project Monitoring with Site Photographs and 4D Project Models. *Organization, technology & management in construction: an international journal*. 2014;6(3):0-
- [3] Alizadehsalehi S, Yitmen I. A concept for automated construction progress monitoring: technologies adoption for benchmarking project performance control. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019;44(5):4993-5008.
- [4] Navon R, Goldschmidt E. Monitoring labor inputs: automated-data-collection model and enabling technologies. *Automation in construction*. 2003;12(2):185-99.
- [5] Navon R, Sacks R. Assessing research issues in automated project performance control (APPC). *Automation in construction*. 2007;16(4):474-84.

- [6] Dawood N, Akinsola A, Hobbs B. Development of automated communication of system for managing site information using internet technology. *Automation in construction*. 2002;11(5):557-72.
- [7] Sacks R, Navon R, Goldschmidt E. Building project model support for automated labor monitoring. *Journal of computing in civil engineering*. 2003;17(1):19-27.
- [8] Abeid J, Allouche E, Arditi D, Hayman M. PHOTO-NET II: a computer-based monitoring system applied to project management. *Automation in construction*. 2003;12(5):603-16.
- [9] Navon R, Kolton O. Model for automated monitoring of fall hazards in building construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2006;132(7):733-40.
- [10] Jang WS, Skibniewski MJ. A wireless network system for automated tracking of construction materials on project sites. *Journal of civil engineering and management*. 2008;14(1):11-9.
- [11] Son H, Kim C. 3D structural component recognition and modeling method using color and 3D data for construction progress monitoring. *Automation in Construction*. 2010;19(7):844-54.
- [12] Cheng T, Teizer J. Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications. *Automation in construction*. 2013;34:3-15.
- [13] Kang H, Sung S, Hong J, Jung S, Hong T, Park HS, et al. Development of a real-time automated monitoring system for managing the hazardous environmental pollutants at the construction site. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;402:123483.
- [14] Kielhauser C, Renteria Manzano R, Hoffman JJ, Adey BT. Automated Construction Progress and Quality Monitoring for Commercial Buildings with Unmanned Aerial Systems: An Application Study from Switzerland. *Infrastructures*. 2020;5(11):98.
- [15] Asadi K, Suresh AK, Ender A, Gotad S, Maniyar S, Anand S, et al. An integrated UGV-UAV system for construction site data collection. *Automation in Construction*. 2020;112:103068.
- [16] Jiao L, Zhang F, Liu F, Yang S, Li L, Feng Z, et al. A survey of deep learning-based object detection. *IEEE Access*. 2019;7:128837-68.
- [17] Tang C, Ling Y, Yang X, Jin W, Zheng C. Multi-view object detection based on deep learning. *Applied Sciences*. 2018;8(9):1423.
- [18] Fang Q, Li H, Luo X, Ding L, Rose TM, An W, et al. A deep learning-based method for detecting non-certified work on construction sites. *Advanced Engineering Informatics*. 2018;35:56-68.
- [19] Fang Q, Li H, Luo X, Ding L, Luo H, Rose TM, et al. Detecting non-hardhat-use by a deep learning method from far-field surveillance videos. *Automation in Construction*. 2018;85:1-9.
- [20] Wu J, Cai N, Chen W, Wang H, Wang G. Automatic detection of hardhats worn by construction personnel: A deep learning approach and benchmark dataset. *Automation in Construction*. 2019;106:102894.
- [21] Zhao Y, Chen Q, Cao W, Yang J, Xiong J, Gui G. Deep learning for risk detection and trajectory tracking at construction sites. *IEEE Access*. 2019;7:30905-12.
- [22] Angah O, Chen AY. Tracking multiple construction workers through deep learning and the gradient based method with re-matching based on multi-object tracking accuracy. *Automation in Construction*. 2020;119:103308.
- [23] Arabi S, Haghighat A, Sharma A. A deep-learning-based computer vision solution for construction vehicle detection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2020;35(7):753-67.
- [24] Hou X, Zeng Y, Xue J. Detecting Structural Components of Building Engineering Based on Deep-Learning Method. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020;146(2):04019097.
- [25] Kim N, Kim K, An Y-K, Lee H-J, Lee J-J. Deep learning-based underground object detection for urban road pavement. *International Journal of Pavement Engineering*. 2020;21(13):1638-50.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.02>

PREGLED NUMERIČKIH METODA ZA MODELIRANJE ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA

OVERVIEW OF THE NUMERICAL METHODS FOR THE MODELLING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Jadran Čarija¹, Mijo Nikolić¹, Željana Nikolić¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, jadran.carija@gradst.hr; mijo.nikolic@gradst.hr; zeljana.nikolic@gradst.hr

Sažetak

U ovome radu dan je pregled razvoja numeričkih modela za modeliranje armiranobetonskih konstrukcija. Pregled područja istraživanja podijeljen je s obzirom na način modeliranja pukotina, diskretizacije područja betona te ugradnje armature. Prikazan je razvoj numeričkih metoda za opis pukotina u armiranobetonskim konstrukcijama od samih početaka do metoda koje se koriste danas. S obzirom na način diskretizacije područja betona koriste se kontinuum i diskretni modeli, gdje je veći naglasak stavljen na opis diskretnih modela. U posljednjemu dijelu rada opisani su načini ugradnje armature u kontinuum modele te načini ugradnje armature i vlakana za ojačavanje unutar diskretnih modela.

Ključne riječi: armirani beton, pukotine, diskretni modeli, kontinuum modeli

Abstract

This paper provides an overview of the development of numerical methods for modelling reinforced concrete structures. The overview of the research area is divided with regard to the cracks modelling, discretization of the concrete domain and modelling of reinforcement. The development of numerical methods for the cracks representation in the reinforced concrete structures has been presented from the very beginning to the methods used today. With regard to manner of the discretization of the concrete domain, continuum and discrete models are used, and the particular emphasis in this paper is on the discrete ones. Finally, reinforcement modelling in the continuum models as well as reinforcement and reinforcement fibers modelling approaches in discrete models are described in the last part of the paper.

Keywords: reinforced concrete, cracks, discrete models, continuum models

1. Uvod

Razvoj armiranobetonskih konstrukcija započinje u 19. stoljeću, a svoj razvoj i širenje doživljavaju u 20. stoljeću, koji se nastavlja i danas. Danas su mnogi stambeni, infrastrukturni i energetski objekti građeni od armiranoga betona te je sve veća potreba za što preciznijim opisom i prikazom procesa loma unutar konstrukcije radi sigurnijega projektiranja novih kao i obnove postojećih građevina. Do sloma unutar armiranobetonskih konstrukcija dolazi uslijed statičkoga ili dinamičkoga opterećenja što uzrokuje raspucavanje betona popraćeno izvijanjem i izvlačenjem armature. Kako bi se što bolje opisali mehanizmi prijenosa sila te loma unutar armiranobetonskih konstrukcija, potrebno je modelirati vezu između betona i armature kao funkciju klizanja armature koju dobivamo iz testa izvlačenja [1]. Općenito gledajući, veza predstavlja interaktivni mehanizam koji omogućuje prijenos sile između armaturnih šipaka i okolnoga betona što osigurava kompozitno djelovanje između tih dvaju materijala. Razumijevanje i modeliranje nastanka pukotina, tečenja armature te klizanja armature u betonu važni su preduvjeti za održavanje i produžavanje vijeka trajanja postojećih konstrukcija, a samim time i projektiranje sve sigurnijih i pouzdanijih novih konstrukcija [2]. Zbog nelinearnosti i disipacijskih mehanizama koji prate te pojave, modeliranje gore navedenih procesa i mehanizama predstavlja složenu zadaću. Radi što boljšega opisivanja navedenih nelinearnosti u inženjerstvu je stalna potreba za razvijanjem što bržih, ali i sve preciznijih numeričkih modela za rješavanje nelinearnih problema ponašanja armiranobetonskih konstrukcija. Stoga se neprestano radi na razvoju i implementaciji praktičnijih i pouzdanijih modela za opis pukotina, diskretizaciji betona i armature te zakona koji opisuju ponašanje u materijalu izloženu nelinearnim deformacijama.

2. Pregled područja istraživanja

2.1. Modeli pukotina

U razvoju numeričkih modela betonskih i armiranobetonskih konstrukcija poseban je naglasak na modeliranju pukotina. Upravo su pukotine glavni razlog zbog kojega dolazi do sloma unutar konstrukcije te kao takve imaju najveći utjecaj na trajnost konstrukcije. Metoda razmazanih pukotina (pukotine se smatraju fiktivnima) i metoda diskretnih pukotina (pukotine se smatraju pravim diskontinuitetima), obje ugrađene unutar metode konačnih elemenata, najviše se, uz diskretne modele, koriste za opisivanje pukotina nastalih unutar konstrukcije.

Modeli razmazanih pukotina [3] zasnivaju se na ideji kako u betonu uslijed njegove materijalne heterogenosti i utjecaja armature nastaju brojne male pukotine koje u kasnijoj fazi opterećivanja poprimaju oblik jedne ili više glavnih pukotina koje smanjuju krutost elementu u smjeru okomitome na os pukotine. U modelu razmazanih pukotina oslabljenje betona opisuje se konstitutivnim vezama gdje se lokalni diskontinuitet raspodjeljuje na pripadnu površinu, odnosno prikazuje se preko kontinuuma. Modeli razmazanih pukotina mogu se podijeliti na modele fiksnih pukotina, gdje je orijentacija pukotina nepromijenjena tijekom proračuna [4], i na modele rotirajućih pukotina, gdje se normala na pukotinu usklađuje s glavnom deformacijom tijekom čitavoga procesa [5]. Glavni je nedostatak razmazanih pukotina što rješenje ovisi o diskretizaciji, tj. o veličini mreže konačnih elemenata.

Modeli diskretnih pukotina razvijaju se 1960-tih godina paralelno s razvojem numeričkih modela armiranobetonskih konstrukcija [6]. Kod tih modela pukotine se modeliraju

odvajanjem elemenata po rubovima pomoću dvostrukih čvorova koji se u neopterećenome stanju poklapaju. Do odvajanja odnosno širenja pukotine dolazi kada čvorna sila prekorači vlačnu čvrstoću betona te se čvor razdvaja na dva čvora. Zbog nastanka dvostrukih čvorova potrebno je redefiniranje mreže tijekom propagacije pukotine, stoga su u kasnijim istraživanjima razvijeni postupci za automatsko redefiniranje mreže [7].

Koristeći standardnu metodu konačnih elemenata pri simuliranju nastanka pukotina, rješenje ovisi o veličini mreže konačnih elemenata [8]. Kako bi se dobila rješenja neovisna o veličini mreže (problem razmazanih pukotina) te kako bi se izbjegla ovisnost širenja pukotine o rasporedu konačnih elemenata (diskretne pukotine), razvijene su poboljšane metode konačnih elemenata ugrađivanjem diskontinuiteta i obogaćivanjem polja pomaka kao što su „proširena metoda konačnih elemenata“ (X-FEM) [9] i „metoda konačnih elemenata s ugrađenim jakim diskontinuitetom“ (ED-FEM) [10].

Glavna razlika između X-FEM-a i ED-FEM-a jest to što se X-FEM smatra „metodom obogaćivanja čvorova (obogaćivanje polja pomaka u čvorovima)“, a ED-FEM „metodom obogaćivanja elemenata (obogaćivanje polja pomaka u elementu)“ [11].

Kod diskretnih modela pri odabiru kriterija loma provjerava se je li kohezivna veza dosegla maksimalnu vrijednost naprezanja za određenu vrstu materijala. Ako jest, uklanjaju se elementi koji su dosegli kritičnu vrijednost ili njihovo ponašanje opisujemo koristeći model omekšavanja [12]. Budući da u diskretnim modelima ispitujemo kriterij loma za svaki element, omogućavamo nastanak (simuliranje) mnogo malih pukotina koje se povezuju, srastaju i u konačnici čine veliku pukotinu, čime je sam prikaz (geometrija) složenih pukotina olakšan. Također, implementirajući ED-FEM unutar diskretnoga modela, dobivaju se rješenja u omekšavanju koja su neovisna o veličini mreže [13].

Pored gore navedenih metoda treba spomenuti metodu konačno-diskretnih elemenata (FEM/DEM) koja objedinjuje metodu konačnih i diskretnih elemenata te se koristi za modeliranje armiranoga betona izložena dinamičkomu i cikličkomu opterećenju [14]. Kod FEM/DEM metode ponašanje materijala do trenutka pojave pukotine modelirano je kao u metodi konačnih elemenata, dok u trenutku prekoračenja vlačne čvrstoće nastaje diskretna pukotina. Pojava pukotina i fragmentacija diskretnih elemenata obuhvaćena je kontaktnim elementima koji su umetnuti među konačnim elementima.

2.2. Diskretizacija betona

Za diskretizaciju betona može se koristiti model kontinuuma zasnovan na 2D konačnim elementima (trokuti, četverokuti), ali i diskretni modeli.

Glavna je prednost diskretnih modela u adekvatnome prikazivanju heterogenosti materijala na mezoskali, što omogućuje simulaciju nastanka i širenja pukotina. Modeli ovakva tipa prikladni su za prikazivanje lomova kod heterogenih materijala, kao što je beton uz veliku učinkovitost proračuna [15].

Diskretni modeli mogu se podijeliti na modele zasnovane na Voronoi poligonima i modele čestica. Model zasnovan na Voronoi poligonima može se definirati kao diskretni model gdje se slaganjem 1-D elemenata može prikazati neko čvrsto tijelo [16]. Opisujući interakciju među poligonima, diskretni model s Voronoi poligonima može se podijeliti u „model opruga“ i „model greda“. U „modelu opruga“ kohezivne veze među poligonima modeliramo pomoću opruga, dok se kod „modela greda“ kohezivne veze modeliraju pomoću greda koristeći Bernoullijeve ili Timoshenkove grede, koje su prikladnije kada su elementi u diskretnome modelu kraći i veće debljine. Diskretizaciju područja vršimo koristeći Voronoi poligone, a mijenjajući materijalna svojstva, kohezivnim vezama među različitim Voronoi poligonima postizemo heterogenost materijala.

2.3. Ugradnja armature u model betona

2.3.1. Kontinuum modeli

Unutar kontinuum modela numeričke modele armiranoga betona možemo podijeliti na tri grupe s obzirom na način modeliranja (ugradnje) armature: model razmazane armature, model diskretne armature i model ugrađene armature.

Model razmazane armature [17] sastoji se od jednoliko raspoređene (razmazane) armature s određenim kutom nagiba naspram elementa betona unutar kojega se ugrađuje. Ovakvi modeli mogu biti pogodni za primjenu kada postoji kompleksan raspored armature ili ojačanja vlaknima unutar betona. Nedostatak je to što se veza između armature i betona smatra idealnom te ne možemo prikazati klizanje armature u betonu.

U modelu diskretne armature unutar 2D betonskih elemenata ugrađuje se 1D element armature. Kod diskretnih modela čvorovi štapnih elemenata armature poklapaju se s čvorovima betonskih elemenata [18]. Ovakvo modeliranje predstavlja problem u inženjerskoj praksi jer se mreža konačnih elemenata betona mora prilagoditi položaju armature. Kod diskretnih modela armature za opisivanje klizanja armature mogu se koristiti zasebni kontaktni elementi koji sadrže karakteristike posmične veze između armature i betona.

U modelu ugrađene armature [19] unutar betona može se ugraditi armatura neovisno o mreži konačnih elemenata. Za diskretizaciju armature koriste se 1D elementi ugrađeni unutar 2D ili 3D betonskih elemenata. Kako bi se dobila krutost elementa betona s ukomponiranom armaturom, potrebno je superponirati matricu krutosti betona i matricu krutosti armature koja se dobije koristeći matrice transformacije. Kod ovih modela moguće je modeliranje klizanja armature u betonu.

Uz ovu osnovnu podjelu postoje i modeli koji kombiniraju model diskretne i ugrađene armature [20].

2.3.2. Diskretni modeli

U nastavku će se opisati neki postojeći primjeri diskretnih modela armiranoga betona ili betona ojačana vlaknima.

Za analizu pojave i širenja pukotina u armiranobetonskim konstrukcijama Saito [12] koristi mrežni model opruga krutih tijela, RBS (engl. *rigid body spring*), s ugrađenom armaturom. Armaturna šipka može se pozicionirati neovisno o definiranoj mreži. Svaka armaturna šipka modelira se nizom štapnih ili grednih elemenata. Veza između armature i betona modelirana je preko opruga u kontaktima, tzv. spojnim (engl. *linkage*) elementima koji su modelirani u smjeru tangente na armaturnu šipku te sadrže karakteristike posmične veze između armature i betona.

Schlangen [21] koristi diskretni model za opisivanje betonskih konstrukcija ojačanih vlaknima. U diskretni model betona ugrađena su vlakna koja su povezana s čvorovima betona preko veznih elemenata. Vlakna su modelirana pomoću grednih ili štapnih elemenata. Svojstva veznih elemenata dobivena su iz eksperimentalnih ispitivanja koristeći test izvlačenja te predstavljaju interakciju između vlakana za ojačanje i betona. Gerstle [22] koristi mikropolarni peridinamčki model, MPLM (engl. *micropolar peridynamic lattice model*), za modeliranje armiranoga betona. Čestice armature povezane su s česticama betona unutar udaljenosti međudjelovanja. Međudjelovanje između čestica armature i betona jednako je međudjelovanju između čestica betona, samo što je ovdje ponašanje linearno elastično, bez oštećenja.

Aydin [23] u svome radu koristi diskretni model ćelija za modeliranje armiranobetonskoga elementa. Mreža je napravljena od jednoliko raspodijeljenih čvorova međusobno udaljenih na zadanu udaljenost. Svaki je čvor u interakciji s ostalim točkama s unaprijed određenom udaljenošću međudjelovanja. Armatura unutar modela također je napravljena kao model ćelija. Unutar utjecaja djelovanja čvora armature dolazi do povezivanja čvorova armature s čvorovima betona.

3. Zaključak

Zahvaljujući razvoju računala, za opisivanje mehanizama loma unutar armirano betonskih konstrukcija sve se više koriste razne numeričke metode koje zamjenjuju skupa eksperimentalna ispitivanja. Preciznost u modeliranju mehanizama ponašanja armiranobetonskih konstrukcija u najvećoj mjeri ovisi o načinu modeliranja betona, armature i njihova međudjelovanja. Armirani beton predstavlja heterogeni kompozitni materijal sa složenim načinom ponašanja koji se do otvaranja prvih pukotina ponaša kao kontinuum, a zatim kao diskontinuum. Svaki numerički model, bilo da je zasnovan na kontinuumu ili diskontinuumu, ima svoje prednosti i nedostatke. Pokazalo se kako je pri djelovanju dinamičkoga i potresnoga opterećenja dominantni efekt nelinearnosti sadržan u otvaranju i zatvaranju pukotina tijekom procesa cikličkoga opterećenja i rasterećenja te pripadnoj deformaciji i kidanju armature, što utječe na gubitak energije i preciznu simulaciju mehanizma sloma. U posljednje vrijeme razvijaju se diskretni modeli za analizu armiranobetonskih konstrukcija kako bi se što realističnije modeliralo ponašanje konstrukcije u cijelome nelinearnom području sve do sloma.

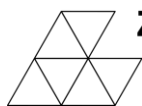
Zahvala

Istraživanje je financirano sredstvima Hrvatske zaklade za znanost u okviru projekata *Razvoj numeričkih modela armirano-betonskih i kamenih zidanih konstrukcija izloženih potresnom opterećenju zasnovanih na diskretnim pukotinama*, IP-2014-09-2319, i KK.01.1.1.02.0027 koji sufinanciraju Vlada Republike Hrvatske i Europska unija preko Europskoga fonda za regionalni razvoj.

Literatura

- [1] Farooq U, Nakamura H, Miura T, Yamamoto Y.: Proposal of bond behavior simulation model by using discretized voronoi mesh for concrete and beam element for reinforcement, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 110, 2020., pp. 103593.
- [2] Ibrahimbegovic A, Boukertous A, Davenne L, Brancherie D.: Modelling of reinforced-concrete structures providing crack-spacing based on X-FEM, ED-FEM and novel operator split solution procedure, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 83, No.4, 2010., pp. 452-481.
- [3] Rashid YR.: Analysis of prestressed concrete pressure vessels, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.7, 1968., pp. 334-344.
- [4] Okamura H, Maekawa K.: *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*, Giho-do Press, University of Tokyo, Japan 1991., pp. 831-850.
- [5] Palermo D, Vecchio FJ.: Compression field modeling of reinforced concrete subjected to reversed loading: formulation, *Structural Journal*, Vol. 100, 2003., pp. 616-625.
- [6] Ngo D, Scordelis AG.: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, *Journal of ACI*, Vol.64, No.3, 1967., pp 152-163.

- [7] Yang ZY, Chen J.: Finite element modelling of multiple cohesive discrete crack propagation in reinforced concrete beams, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.72, 2005., pp. 2280-2297.
- [8] Ibrahimbegovic A. *Nonlinear Solid Mechanics: Theoretical Formulations and Finite Element Solution Methods*, Springer, London, 2009.
- [9] Moes N, Dolbow J, Belytschko T.: A Finite Element Method for Crack Growth without Remeshing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.46, 1999., pp. 131-150
- [10] Simo JC, Oliver J, Armero F.: An analysis of strong discontinuities induced by strain-softening in rate-independent inelastic solids, *Computational Mechanics*, Vol.12, No.5, 1993., pp. 277-296.
- [11] Oliver J, Huespe AE, Sanchez PJ.: A comparative study on finite elements for capturing strong discontinuities: E-FEM vs. X-FEM, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.195, 2006., pp. 4732-4752.
- [12] Saito S, Hikosaka H.: Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring network models, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, JSCE, Vol.44, No.627, 1999., pp. 289-303.
- [13] Čarija J, Nikolić M, Ibrahimbegovic A, Nikolić Ž.: Discrete softening-damage model for fracture process representation with embedded strong discontinuities, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.236, 2020., pp. 107211.
- [14] Nikolić Ž, Živaljić N, Smoljanović H, Balić I.: Numerical modelling of reinforced-concrete structures under seismic loading based on the finite element method with discrete inter-element cracks, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.46, No.1, 2017., pp. 159-178.
- [15] Cusatis G, Bažant ZP, Cedolin L.: Confinement-shear lattice CSL model for fracture propagation in concrete, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.195, No.52, 2006., pp. 7154-7171.
- [16] Nikolić M, Karavelić E, Ibrahimbegovic A, Miscević P.: Lattice Element Models and Their Peculiarities, *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol.25, No.3, 2018., pp. 753-784.
- [17] Dahmani L, Khennane A, Kaci S.: Crack identification in reinforced concrete beams using ANSYS software, *Strength Material* Vol.42, No.42, 2010., pp. 232–240.
- [18] Kwan AKH, Ng PL.: Modelling dowel action of discrete reinforcing bars for finite element analysis of concrete structures, *Computers and Concrete*, Vol.12, No.1, 2013., pp. 19-36.
- [19] Nikolić Ž, Mihanović A.: Non-linear finite element analysis of post-tensioned concrete structures, *Engineering Computations*, Vol.14, No.5, 1997., pp. 509-528.
- [20] Bitencourt Jr LAG, Manzoli OL, Trindade YT, Rodrigues EA, Dias-da-Cost D.: Modeling reinforced concrete structures using coupling finite elements for discrete representation of reinforcements, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 149, 2018., pp. 32-44.
- [21] Schlangen E, Qian Z.: 3D modeling of fracture in cement-based materials, *Journal of Multiscale Modelling*, Vol. 1, No. 2, 2009., pp. 245-261.
- [22] Gerstle W, Geitanbaf HH, Asadollahi A.: Computational simulation of reinforced concrete using the micropolar state-based peridynamic hexagonal lattice model, In *Proc., 8th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. Toledo, Spain: IA-FRAMCOS, 2013., pp. 261–270.
- [23] Aydin BB., Tuncay K, Binici B.: Simulation of Reinforced Concrete Member Response Using Lattice Model, *Journal of Structural Engineering*, Vol.145, No. 9, 2019., pp. 04019091



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.03>

SOLARNE ELEKTRANE I UNUTARNJA HIDROENERGIJA VODOOPSKRBNIH SUSTAVA - MOGUĆE RJEŠENJE ODRŽIVOSTI

SOLAR POWER PLANTS AND INTERNAL HYDRO POWER OF WATER SUPPLY SYSTEMS - A POSSIBLE SUSTAINABILITY SOLUTION

Tatjana Džeba¹

(1) Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, Matice hrvatske b.b., Mostar,
tatjana.dzeba@gf.sum.ba

Sažetak

U ovome članku prikazat će se recentne primjene obnovljivih izvora energije i istraživanja o mogućnosti energetske održivosti vodoopskrbnih sustava uporabom obnovljivih izvora energije u hibridnome sustavu kao vanjskomu izvoru energije i iskorištavanju raspoloživoga viška tlaka u vodoopskrbnim sustavima preko turbinskoga rada crpke u cijevi. Naglasak se stavlja na solarne fotonaponske elektrane.

Ključne riječi: urbani vodni sustav, obnovljivi izvori energije, vodoopskrba, hibridni sustavi, solarni fotonaponski (PV) paneli, crpke kao turbine, smanjenje štetnih plinova, održivost sustava

Abstract

This paper will present recent applications of renewable energy sources and research on the possibility of energy sustainability of water supply systems using renewable energy sources in a hybrid system as an external energy source, and utilization of available excess pressure in water supply systems through turbine pump operation. Emphasis is placed on solar photovoltaic power plants.

Keywords: urban water system, renewable energy sources, water supply, hybrid systems, solar photovoltaic (PV) panels, pumps as turbines, reduction of harmful gases, system sustainability

1. Uvod

Komunalna poduzeća koriste energiju za razne namjene. Količina utrošene energije nije zanemariva. Istraživanje provedeno na temelju analize telemetrijskih podataka o potrošnji vode u Thames Water Utilities Ltd (TWUL), najvećoj tvrtki za vodu i otpadnu vodu u Velikoj Britaniji koja opslužuje London, jedan od najvećih megagrađova u svijetu, pokazuje kako je energetska intenzivnost vodnih usluga u svakoj uslužnoj zoni komunalnoga poduzeća izmjerena u rasponu 0,46 – 0,92 kWh/m³ [1]

Rezultati studije provedene u Oslu u Norveškoj i Nantesu u Francuskoj pokazuju kako bi se za nekoliko godina, uvodeći nove tehnologije te koristeći pravilno nusproizvode (bioplina i mulj iz otpadnih voda), moglo nadoknaditi do dvije trećine energije koju koriste komunalne tvrtke te tako povećati njihova održivost [2]. Ista studija navodi kako otiske ugljika u svezi s potrošnjom vode, odnosno 25 kg CO₂ / stan. god. u Nantesu i 45,5 kg CO₂ / stan. god. u Oslu, ne smatraju izuzetno visokima u odnosu na ostale usluge. Međutim, utjecaji ugljika u svezi s količinom potrošene energije prilično su visoki: 215 g CO₂ / kWh za francusku tvrtku i 145 g CO₂ / kWh za norvešku tvrtku.

U Španjolskoj približno 5,8 % ukupne potražnje za električnom energijom dolazi iz sektora voda [3]. U studiji provedenoj 2008. godine [4] procijenjeno je kako 5,5 % emisija stakleničkih plinova u Velikoj Britaniji dolazi iz gradske uporabe vode. Proizvodnja vode, tj. dovod pitke vode i tretman otpadnih voda iznosi 0,8 % emisije stakleničkih plinova u Velikoj Britaniji

Koristeći zabilježene podatke s istoga općinskoga komunalnog okruga Bay u Kaliforniji, kalibriran je model energije koja se koristi u vodoopskrbi, pročišćavanju pitke vode, crpljenju i pročišćavanju otpadnih voda koje provodi komunalno poduzeće, te je procijenjen otisak ugljika za urbani vodni ciklus u iznosu od 372 kg CO₂ / osobi / godini, što predstavlja približno 4 % ukupnih emisija po stanovniku u Kaliforniji. Dobavljač električne energije, radna skupina PG&E, iznosi podatak o emitiranju 0,24 kg CO₂ / kWh opslužene električne energije [5].

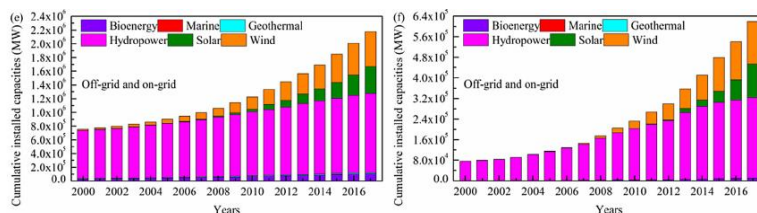
U ovome radu prikazat će se recentne primjene obnovljivih izvora energije i istraživanja o mogućnosti energetske održivosti vodoopskrbnih sustava uporabom obnovljivih izvora energije u hibridnome sustavu kao vanjskomu izvoru energije i iskorištavanje raspoloživoga viška tlaka u vodoopskrbnim sustavima preko turbinskoga rada crpke u cijevi. Za ukupnu održivost vodoopskrbe, također, važnu tehnološku, energetska i sigurnosnu funkciju imaju vodospremnici [6].

2. Obnovljivi izvori energije: rastući trend i primjeri iz prakse

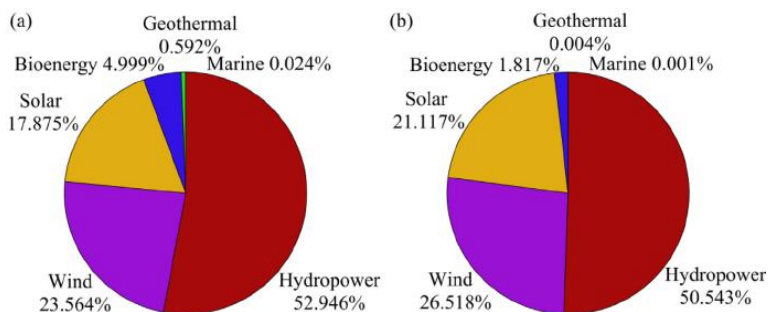
Obnovljivi izvori energije sve više dobivaju na važnosti, primjerice, potrošnja energije proizvedene u postrojenjima za obnovljive izvore u SAD-u 2020. godini rasla je već petu godinu zaredom i dosegla rekordan iznos od 12 % ukupne američke potrošnje energije. Istodobno, obnovljivi izvori bili su jedini izvor energije u SAD-u čija je potrošnja u 2020. godinu porasla u odnosu na 2019. godinu jer su pale i potrošnja fosilnih goriva i potrošnja nuklearne energije. Najveći udio u ukupnoj potrošnji energije iz obnovljivih izvora SAD-a, 26 %, otpada na vjetroenergiju. Na hidroenergiju, odnosno na hidroelektrane, otpada 22 %, na energiju iz biomase (šumske biomase i otpada) također 22 %, na biogoriva (bioetanol, biodizel itd.) otpada 17 %, dok na solarnu energiju otpada 11 % potrošnje energije iz obnovljivih izvora u SAD-u, a iz nje se proizvode električna (u solarnim elektranama i solarnim termoelektranama) i toplinska energija (u solarnim toplinskim sustavima i solarnim toplinama). Pri tome se njezina potrošnja u 2020. u odnosu na prethodnu godinu povećala za 22 % [7].

Uspoređujući kumulativne instalirane kapacitete različitih obnovljivih izvora energije (hidroenergija, solarna energija, energija vjetra, bioenergija, energija mora i geotermalna energija), može se vidjeti kako u svijetu i u Kini u razdoblju od 2000. do 2017. godine uporaba solarne i energije vjetra ima najbrži rast u odnosu na ostale obnovljive izvore energije. Navedeno je prikazano na Slici 1

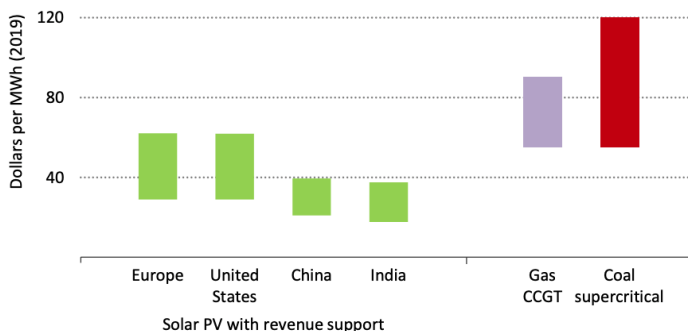
Slika 2 pokazuje kako hidroenergija, solarna energija i energija vjetra iznose približno 94,4 % ukupne instalirane obnovljive energije u svijetu (a) i u Kini (b) [8].



Slika 1. Kumulativni instalirani kapaciteti različitih obnovljivih izvora energije (hidroenergija, solarna energija, energija vjetra, bioenergija, energija mora i geotermalna energija) u svijetu i u Kini u razdoblju od 2000. do 2017. godine. [8]



Slika 2. Postotak instaliranih kapaciteta različitih obnovljivih izvora energije u 2017. godini (a) u svijetu i (b) u Kini [8]



Slika 3. Cijene izgradnje solarnih fotonaponskih panela u USD/MWh proizvedene energije uz različite poticaje po zemljama.

Različiti poticaji za uporabu solarne energije čine i razliku u cijeni izgradnje istih koja se u 2019. godini kretala od 20 do 40 USD-a/MWh u Indiji i Kini, odnosno od 30 do 60 USD-a/MWh u Europi i SAD-u, što je prikazano na Slici 3.

2.1. Solarna energija - primjeri uporabe u svijetu i kod nas

Uporaba solarne energije kao jednoga od raspoloživih izvora obnovljive energije nije novina u svijetu. Sve se više grade solarne elektrane za različite namjene radi smanjenja emisije ugljika što predstavlja doprinos u borbi protiv klimatskih promjena. Solarne elektrane grade se na tlu, ali i nad vodonatapnim kanalima (Slika 4) kao i na akumulacijama brana (Slika 5) [9].



Slika 4. Solarni fotonaponski paneli nad vodonatapnim kanalima, Indija [9]



Slika 5. Solarni fotonaponski paneli na akumulaciji brane Gangen, Japan [9]



Slika 6. Plutajuća fotonaponska solarna elektrana u Singapuru [10]



Slika 7. DC Kanovci-Vinkovački vodovod i kanalizacija [12]

U Singapuru je u srpnju 2021. godine puštena u pogon plutajuća solarna elektrana snage 60 MW na vodenoj površini od 45 hektara (Slika 6) koja će proizvoditi dovoljno električne energije za napajanje pet postrojenja za prečišćavanje vode na otoku. Planirana je izgradnja još četiriju takvih solarnih elektrana kako bi ovaj grad u jugoistočnoj Aziji ispunio svoj cilj: do 2025. godine četiri puta povećati svoju proizvodnju solarne energije. Plutajući paneli imaju bolji učinak od krovnih panela (između pet i petnaest posto) zbog učinka hlađenja koji pruža voda i činjenice kako nemaju učinak zaklanjanja sunca od okolnih zgrada. Prema procjeni singapurske Agencije za vodu ovakva solarna elektrana mogla bi pomoći u smanjenju emisije ugljika za oko 32 kilotone godišnje, što je ekvivalent količini ugljika koju proizvede 7000 automobila [10].

Na rezervoaru za opskrbu pitkom vodom u Londonu, koji se nalazi u njegovoj neposrednoj blizini, 2016. godine izgrađena je plutajuća solarna elektrana. Od ukupne količine potrošene struje u tvrtki za preradu pitke vode Thames Water Utility Ltd, koji godišnje iznosi 144 milijuna dolara, iz ove solarne elektrane osigurava se 28 milijuna dolara godišnje [11].

U Republici Hrvatskoj također je rastući trend gradnja solarnih elektrana, a primjer jedne takve za potrebe komunalnoga poduzeća Vinkovci ostvaren je provedbom Interreg IPA programa prekogranične suradnje Hrvatska – Srbija X-DEGREE, čiji je cilj promicanje i unaprjeđenje korištenja raznih oblika obnovljivih izvora energije u prekograničnome području. Osiguranje proizvodnje električne energije imat će pozitivan utjecaj na smanjenje emisije CO₂, a osigurat će i proizvodnju dodatnih kW električne energije iz obnovljivih izvora energije koja će se koristiti za proizvodnju pitke vode u području djelovanja VVK (Slika 7) [12].

U sklopu projekta Energijom sunca do pitke vode tvrtka Vodovod grada Vukovara potpisala je u lipnju 2021. godine ugovor za izgradnju solarne elektrane na krovu pogona i drugih objekata VGV-a, koja je prva od tri planirane faze solarnih elektrana [13]. Općine Vrgorac u RH i Ljubuški u BiH išle su na prijavu Interreg IPA CBC projekta RE-Water [14], tj. izgradnju fotonaponskih panela za hibridni sustav za napajanje crpki na vodocrpljivim ovih dviju općina. Projektna prijava nije prošla u prvome krugu, ali je stavljena na rezervnu listu projekata. U međuvremenu se traže drugi izvori financiranja za provođenje planiranih aktivnosti: u Vrgorcu u sklopu projekta Solar-City, a u Ljubuškom preko UNDP-ja u BiH.

3. Zaključak

Vodoopskrbni sustavi troše velike količine energije za podizanje vode na potrebne projektirane visinske kote kako bi tu istu energiju uništavali u sustavima poput rasteretnih komora ili reduciranje tlaka, što je osobito izraženo na našim područjima gdje je razuđenost potrošača velika, a konfiguracija terena visinski jako promjenjiva (neujednačena). To povlači za sobom velike troškove za električnu energiju koju komunalna poduzeća ne mogu financirati zbog niske cijene 1 m³ vode te njihovo poslovanje nije održivo, a u isto vrijeme povećavaju negativan utjecaj na okoliš stvaranjem i otpuštanjem stakleničkih plinova nastalih korištenjem energije dobivene iz fosilnih goriva.

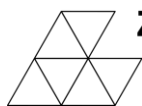
Studija provedena u Lisabonu 2010. godine pokazala je učinkovitost korištenja hibridnoga sustava (korištenje vjetroenergije i energije iz mreže za razdoblje bez puhanja vjetra) u kombinaciji s korištenjem unutarnje hidroenergije postavljanjem turbine izravno u cijev preko *bypassa* u oknu reduciranoga tlaka. Emisija CO₂ bila je duplo manja u odnosu na korištenje električne energije samo iz elektromreže, a uštede u troškovima bile su značajne [15].

U radu objavljenom 2018. godine autor je pokazao okvirni koncept kojim je moguće ostvariti održivost sustava osiguranjem kontinuiteta opskrbe električne energije integrirajuću solarnu elektranu s konvencionalnim izvorima energije kroz električnu mrežu ili koristeći vodospremnik kao spremnik energije, uključujući i reverzibilnu hidroelektranu ugrađivanjem crpke kao turbine u vodovodnu cijev [16]. Jedan od izazova koje treba riješiti jest i izbor tipa turbine u promjenjivim uvjetima rada.

Istraživanjem će se dokazati kako je ovakav način rada vodoopskrbnoga sustava pametno rješenje jer će dovesti do vrlo visoke sigurnosti u opskrbi energijom, bolje kontrole troškova i redukcije emisije CO₂.

Literatura

- [1] Majid, A., Cardenes, I., Zorn, C., Russell, T., Colquhoun, K., Bañares-Alcantara, R., W.Hall, J.: An Analysis of Electricity Consumption patterns in the Water and Wastewater Sectors in South East England, UK, Water 2020, vol 12 (issue 1), 2020., 225, <https://doi.org/10.3390/w12010225>
- [2] Vachon, M.: Nantes´ and Oslo´s urban water systems: Assessing benefits from water energy nexus interventions. Report number D1-2012-36, NTNU-Trondheim, 2012., Norwegian University of Science and Technology
- [3] Hardy, L., Garrido, A.&Juana, L.: Evaluation of Spain´s Water-Energy Nexus, International Journal of Water Resources Development, Volume 28, 2012, 151-170, <https://doi.org/10.1080/07900627.2012.642240>
- [4] Reffold, E., & other.: Greenhouse gas emissions of water supply and demand options, Science Report-SC070010, Environment agency, 2008.
- [5] Escriva-Bou, A., Lund, J.R., Pulido-Velazquez, M.: Saving Energy From Urban Water Demand Management, Water Resources Research, Volume 54, Issue 7, (4265-4276), 2018., <https://doi.org/10.1029/2017WR021448>
- [6] Đurin, B., Margeta, J., Bojanić, D.: The Impact of the Water Consumption Regime on the Work of Reservoirs, E-Water 1, 1-21, 2015.
- [7] <http://www.energetika-net.com/vijesti/obnovljivi-izvori-energije/rekordna-potrosnja-energije-iz-obnovljivih-izvora-u-sad-u-32770>, -: 20. 7. 2021.
- [8] Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., Chaima, E.: A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems, Elsevier-Energy Conversion and Management 199, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112027>
- [9] Kougiass, J., Bódis, K., Jäger-Waldau, A., Moner-Girona, M., Monforti-Ferrario, F., Ossenbrink, H. Szabó, S.: The potential of water infrastructure to accommodate solar PV system in Mediterranean islands, Elsevier Ltd. Solar Energy 136, 174-182, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.003>
- [10] <https://bigportal.ba/u-singapuru-otvorena-najveca-plutajuca-solarna-farma-na-svijetu/>, pristupljeno: 16. 7. 2021.
- [11] <https://balkans.aljazeera.net/news/technology/2016/3/29/solarna-farma-na-vodica-smanjenje-racuna>, pristupljeno: 16. 7. 2021
- [12] <https://vvk.hr/eu-projekti/264-solarne-elektrane-na-uredajima-vinkovackog-vodovoda-i-kanalizacije.html>, pristupljeno: 22.07.2021.
- [13] <http://www.energetika-net.com/vijesti/obnovljivi-izvori-energije/suncevom-energijom-do-pitke-vode-32796>, pristupljeno: 16. 7. 2021
- [14] Džeba, T., Mimica, M. Prskalo, M.: Održiva energija & uporaba u javnoj vodoopskrbi, ZT2019., Bogdanić, A., Tijanić, K., Živković, L., Šopić, M., Pajalić, S., Rijeka, Sveučilište u Rijeci, GF(77-91), 2019. ISBN 978-953-6953-51-6
- [15] Ramos, M., Vieira, F., I.C. Covas, D.: Energy efficiency in a Water supply system: Energy consumption and CO₂ emission, Water Science and Engineering, 2010, 3(39, 331-340, doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2010.03.009
- [16] Margeta, J.: A Framework for Application of Renewable Energy in Urban Water Systems, e-gfos, number 16, 2018., <https://doi.org/10.13167/2018.16.1>



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.04>

FINITE ELEMENT MODEL UPDATING METHODS FOR STRUCTURAL APPLICATION

METODE POBOLJŠANJA NUMERIČKIH MODELA KONAČNIH ELEMENATA U ANALIZI KONSTRUKCIJA

Suzana Ereiz¹, Ivan Duvnjak², Javier Fernando Jiménez-Alonso³

(1) University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, suzana.ereiz@grad.unizg.hr

(2) University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, ivan.duvnjak@grad.unizg.hr

(3) University of Seville, Higher Technical School of Engineering, jfjimenez@us.es

Sažetak

Numerički modeli konstrukcija predstavljaju suvremeni alat za kontinuirano praćenje konstrukcija, detekciju oštećenja, predviđanje životnog vijeka te definiranje optimalne strategije njihova održavanja. Poznato je da zbog ulaznih parametara kao što su krutosti, masa i rubni uvjeti dobivamo nepouzdanu numeričke modele. Kako bi se navedeni problem riješio, primjenjuju se metode poboljšanja numeričkih modela primjenom rezultata eksperimentalnih ispitivanja kojima se određuju dinamički parametri konstrukcije. U radu je dan kratak pregled postupka poboljšanja numeričkih modela konstrukcija primjenom eksperimentalno određenih dinamičkih parametara-frekvencije, oblika titranja. Navedene su neke od metoda koja se najčešće primjenjuju te su istaknute njihove prednosti i nedostaci.

Ključne riječi: Poboljšanje numeričkog modela, praćenje konstrukcija, dinamička analiza konstrukcija, ispitivanje konstrukcija

Abstract

Structural finite element models are a modern tool for continuous monitoring of structures, damage detection, prediction of service life and determination of optimal strategy for maintenance. It is well known that we get uncertain numerical models due to the input parameters such as stiffness, mass, and boundary conditions. To solve this problem, finite element model updating methods are used in combination with the results of structural dynamic tests or structural health monitoring data. In this paper, a brief overview of the procedure for updating finite element models using experimentally determined structural dynamic parameters - natural frequencies and natural modes - is given. Some of the most commonly used methods are listed and their advantages and disadvantages are highlighted.

Keywords: Finite element model updating, Structural Health Monitoring, Dynamic analysis of structures, experimental investigation

1. Introduction

Finite element model updating (FEMU) emerged in the 1990s as a topic of the great importance for the design [1], construction [2], and maintenance of mechanical systems [3] and structures [4]. As for civil engineering structures, it refers to the updating of its models to assume its dynamics behaviour more precise and accurate (Figure 1.). To minimize the differences and maximize the correlation between the numerical model and the real structure, the model updating (MU) of the civil engineering structure is most often performed by applying the structural dynamic test results.

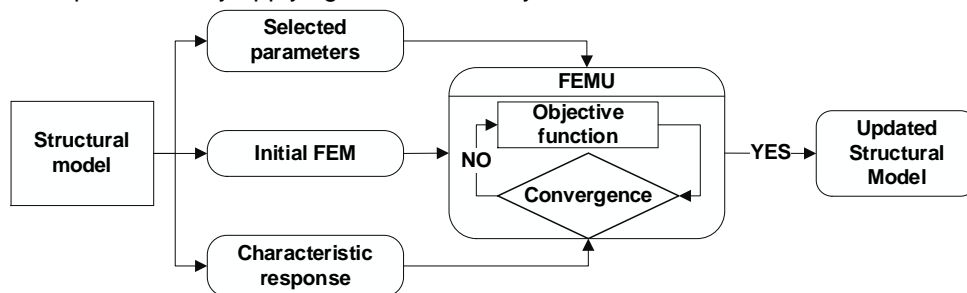


Figure 1. Flowchart of finite element model updating iterative procedure

In addition to dynamic, the static test results [4] or its combination with dynamic test results is also apply [5]. The conducting of FEMU is mainly focused on the determination of most relevant structural parameter values such as geometry, material properties, and boundary conditions. Those parameters minimize the differences between the structural behaviours predicted by the numerical model from the actual behavior of the structure. The reasons why there are differences between the predicted behavior of a numerical model of the structure and its actual behavior include model structure errors [6], model order errors [7], model parameter errors, and errors in measurements [8]. Many of investigation is mainly focused on the finite element model updating using structural dynamic parameters - natural frequency, mode shapes and damping ratio. The advantages of using these parameters are that they are easy to apply for damage detection. Also, they are most appropriate when there is a large error in the numerical modelling, and they are directly related to the topology of the structure. In this type of data, most of the structural parameters that best describe the global behavior are include [9]. On the other hand, the determination of the structural dynamic properties for identification is computationally intensive and prone to additional noise. Moreover, it is not able to extract the modes of the frequency bandwidth and is only suitable for highly damped and linear structures.

The FEMU method can generally be classified as the automated and manual methods [10], and iterative (non-direct) and non-iterative (direct) methods [8]. The main difference between the manual and automated method lies in the number of selected updating parameters and in the way the model updating is performed - using trial and error methods (manual FEMU) or automated process. The division of MU methods into iterative and non-iterative methods is somewhat more concrete. As their name say, the differences between them are in the way the model updating is implemented, using iterative process or not. The iterative methods are further divided into deterministic methods and Bayesian method. Based on the targeted responses used to update the numerical model, deterministic methods can be further divided into two groups: (1) methods that use eigenvalues and eigenvectors (eigenfrequencies, mode shapes, damping coefficient) and (2) methods that use frequency response data. The following

chapters describe the process of FEMU and give a brief overview of the methods, categorized into matrix update methods, sensitivity-based methods, iterative optimization methods, Bayesian methods, and computational intelligence methods.

2. Selection of updating parameters

The success of the finite element model update implementation depends on the selection of the updating parameters. It is very important to properly define the model parameterization and estimate the unknown parameters from ill-conditioned equations. In addition to parameterization, the uniqueness of the updating parameters, computational efficiency, ill-conditioned equations, and the use of incomplete data is also important. The selected parameters of the numerical model that are being updated should be able to explain the uncertainties or inaccuracies of the model, provided that the output data are sensitive to the input parameters of the model. There are several methods that are used for selection of updating parameters (Figure 2).

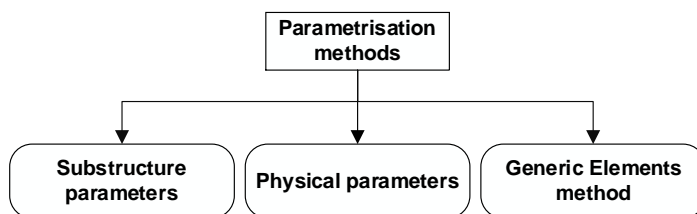


Figure 2. Parametrisation methods for FEMU

One of them is to define the scalar multipliers associated with the mass, stiffness and damping matrices. Second parametrization method employs the direct material and geometrical properties of structures [11]. Third one, generic method by adjusting the eigenvectors and eigenvalues of individual elements or sub-structure update the stiffness and mass matrices. Regardless of the selected parameterization method, the set of selected updating parameters should be as small as possible to eliminate unnecessary parameters and reduce computational cost [11].

3. Definition of the objective function

Formulation of the objective function for the FEMU problem must take into account the residuals that are sensitive to the selected updating parameters [12]. Objective function in FEMU formulation is defined in form of the residuals which describe the differences between structural behaviour predicted by numerical model and its actual behaviour. Usually, it is defined by considering two types of residuals: the first one is associated with the natural frequencies while the second is associated with the corresponding mode shapes. The influence of those two residuals on the objective function can be evaluated via two approaches: the single objective function (1) and multi objective function (2) approach.

$$F(x) = \sum_{i=1}^{NF} w_i F_i(x) \quad (1)$$

$$(F_i(x)) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_{NF}(x)) \quad (2)$$

Single objective function (1) approach is characterized by only one objective function. in terms of the sum of weighted residuals usually obtained using the trial-and-error method. In the multi objective function approach (2) each component of the objective

function is defined in terms of unweighted residuals. Several no-dominated solutions are obtained. For those solutions, no objectives can be improved without sacrificing at least one the objectives. In defining the FEMU problem in probabilistic method instead of the objective function the probability density function is defined [13].

4. Finite element model updating methods

4.1. Matrix update methods

The matrix update method is mainly based on updating the structural mass, stiffness, or damping matrices. They are implemented to minimize the differences between the analytical and measured matrices. The main concept is based on changing the global stiffness, mass or damping matrices to an improved numerical model that accurately reproduces the experimental results [14]. Their application directly minimizes the differences between experimentally and numerically obtained structural dynamic parameters. These methods are computationally expensive and it is difficult to find a global minimum through the optimization techniques since there are several stationary points [8].

4.2. Sensitivity based methods

In the sensitivity based FEMU methods the experimentally obtained structural dynamics parameters – natural frequencies and mode shapes are adopted for updating the initial numerical model. These methods allow a wide choice of the parameters for model updating and measured outputs to be weighted. With the respect to parameters, determination of the sensitivity of the measurements is computationally intensive and the approximation of the sensitivity may only be obtained. The sensitivity is most often the non-linear function of the updating parameters, an iterative procedure is necessary. This iterative procedure is associated with the convergence problem to solve for the selected parameters [15]. Sensitivity based method has some limitations related to request of existence of a sensitivity matrix with the respect to all updating parameters, computational costs and they may not be applicable for structure which contain a considerable amount

4.3. Dynamic perturbation method and regularization algorithm

For the situation in which the difference between actual and predicted structural behaviour is sufficiently large, the linear or first order approximations may be inappropriate. An exact relationship between the perturbation of structural parameters and the perturbation of the associated dynamic parameters is used for the FEMU. This method directly adopts the measure incomplete structural dynamic parameters and in the FEMU process it doesn't require mode shape expansion or reduction. This method needs much less computational effort to estimate updating parameters. It provides optimised solutions for MU in the least squares sense without requiring optimisation techniques. Also, this method offers reliable estimates of structural updating parameters, even in the cases where relatively large modifications in structural parameters and/or in modal properties exist between the finite element model and the tested structure [16].

4.4. Iterative optimization and computational intelligence algorithm

Iterative optimization methods transform the FEMU into the optimization problem. On this way the objective function is defined as the relative differences, i.e., residuals, between the behaviour of structure predicted by numerical model and its actual behaviour. There are two different ways in which these residuals can be defined. The first one is as single objective optimization problem, while the second one is the multi-objective optimization problem. To solve the optimization problem of FEMU the computational intelligence algorithms are used (Figure 3)[17].

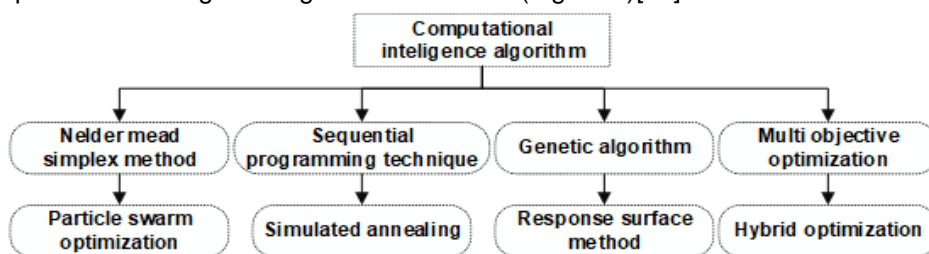


Figure 3. Computation intelligence algorithm for FEMU[8]

4.4.1. Bayesian method

The Bayesian FEMU method approaches are based on the development of the numerical model as a statistical problem focusing on estimation the probabilistic density function of the numerical model physical parameters. This method uses Bayesian probability theory for defining the posterior probability density function of the physical parameters of the model. Density function is estimated in terms of the likelihood and prior probability density functions [18]. This method has some disadvantage related to a complex numerical model, which is often time consuming and computationally limited, limiting its application on large real structures.

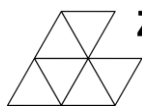
5. Conclusion

With the ever-advancing development of computer software and structural health monitoring techniques, ever-increasing demands are being placed on the numerical modelling of structures. This has created a need for the development of methods that combine computer software and SHM techniques into numerical models to describe real structure as accurately and precisely as possible. The numerical models obtained can be used for various purposes, from monitoring the construction phases, to the maintenance of the structure and its restoration, to important related decisions. This paper gives a brief overview of the process of implementing model updating and the most used methods for this purpose. Their advantages and disadvantages are highlighted. The aim of this paper is to learn about the process of implementing finite element model updating through its various stages and the advantages and disadvantages of the methods used for updating numerical models

Literature

- [1] J. L. Zapico, M. P. González, M. I. Friswell, C. A. Taylor, and A. J. Crewe, "Finite element model updating of a small scale bridge," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 268, no. 5, pp. 993–1012, 2003, doi: 10.1016/S0022-460X(03)00409-7.

- [2] A. Suzuki, M. Kurata, X. Li, and S. Shimmoto, "Residual structural capacity evaluation of steel moment-resisting frames with dynamic-strain-based model updating method," *Earthquake engineering & Structural Dynamics*, 2017, doi: DOI: 10.1002/eqe.2882.
- [3] J. E. Mottershead, M. Link, and M. I. Friswell, "The sensitivity method in finite element model updating: A tutorial," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 7, pp. 2275–2296, 2011, doi: 10.1016/j.ymssp.2010.10.012.
- [4] S. Schommer, V. H. Nguyen, S. Maas, and A. Zürbes, "Model updating for structural health monitoring using static and dynamic measurements," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 2146–2153, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.156.
- [5] Z. Ismail, K. K. Kuan, K. S. Yee, and O. Z. Chao, "Examining the trend in loss of flexural stiffness of simply supported RC beams with various crack severity using model updating," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 50, no. 1, pp. 43–49, 2014, doi: 10.1016/j.measurement.2013.12.036.
- [6] L. Sun, Y. Li, and W. Zhang, "Experimental Study on Continuous Bridge-Deflection Estimation through Inclination and Strain," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 25, no. 5, p. 04020020, 2020, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001543.
- [7] L. Sun, Y. Li, W. Zhu, and W. Zhang, "Structural response reconstruction in physical coordinate from deficient measurements," *Engineering Structures*, vol. 212, no. March, p. 110484, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110484.
- [8] T. Marwala, *Finite-element model Updating Using Computational Intelligence Techniques*, 1st ed. London, England: Springer-Verlag London, 2010.
- [9] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Second Edi. Hertfordshire: Research Studies Press Ltd, 2000.
- [10] A. C. Altunişik, E. Kalkan, F. Y. Okur, O. Ş. Karahasan, and K. Ozgan, "Finite-Element Model Updating and Dynamic Responses of Reconstructed Historical Timber Bridges using Ambient Vibration Test Results," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 34, no. 1, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001344.
- [11] M. I. Friswell, J. E. Mottershead, and H. Ahmadian, "Finite-element model updating using experimental test data: Parametrization and regularization," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 359, no. 1778, pp. 169–186, 2001, doi: 10.1098/rsta.2000.0719.
- [12] N. F. Alkayem, M. Cao, Y. Zhang, M. Bayat, and Z. Su, "Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey," *Neural Computing and Applications*, vol. 30, no. 2, pp. 389–411, 2018, doi: 10.1007/s00521-017-3284-1.
- [13] T. Marwala, I. Boulkaibet, and S. Adhikari, *Probabilistic Finite Element Model Updating using Bayesian Statistics. Application to aeronautical and mechanical engineering*, First. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd Registered, 2017.
- [14] M. Girardi, C. Padovani, D. Pellegrini, M. Porcelli, and L. Robol, "Finite element model updating for structural applications *," vol. 2014, pp. 2016–2018, 2018.
- [15] H.-P. Chen, *Structural health monitoring of civil engineering structures*. John Wiley and Sons Inc., 2018.
- [16] H. P. Chen and K. F. Tee, "Structural finite element model updating using incomplete ambient vibration modal data," *Science China Technological Sciences*, vol. 57, no. 9, pp. 1677–1688, 2014, doi: 10.1007/s11431-014-5619-9.
- [17] J. F. Jiménez-Alonso, J. Naranjo-Perez, A. Pavic, and A. Sáez, "Maximum Likelihood Finite-Element Model Updating of Civil Engineering Structures Using Nature-Inspired Computational Algorithms," *Structural Engineering International*, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1080/10168664.2020.1768812.
- [18] B. Goller and G. I. Schuëller, "Investigation of model uncertainties in Bayesian structural model updating," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, no. 25, pp. 6122–6136, 2011, doi: 10.1016/j.jsv.2011.07.036.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.05>

PREGLED METODA ZA PRAĆENJE LOKALNOGA PODLOKAVANJA UZ STUPOVE MOSTA

OVERVIEW OF THE TECHNIQUES FOR THE REAL-TIME SCOUR MONITORING NEXT TO BRIDGE PIERS

Robert Fliszar¹, Gordon Gilja²

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, robert.fliszar@grad.unizg.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, gordon.gilja@grad.unizg.hr

Sažetak

Erozivno djelovanje toka u prirodnim vodotocima uzrokuje pojavu kaverni nastalih podlokavanjem oko građevina u koritu, od kojih je najčešće riječ o elementima mosta. Budući da podlokavanje oko mosta može bitno utjecati na promjenu opterećenja i posljedično njegovu sigurnost, važno je provoditi redovno praćenje stanja korita i evidentirati promjene u njemu. U ovome radu predstavljen je pregled opreme koja se koristi za praćenje podlokavanja, njezinih prednosti i nedostataka kao i osvrt na njezinu primjenjivost u uvjetima nailaska velikih vodnih valova.

Ključne riječi: podlokavanje, most, monitoring, kaverna, R3PEAT

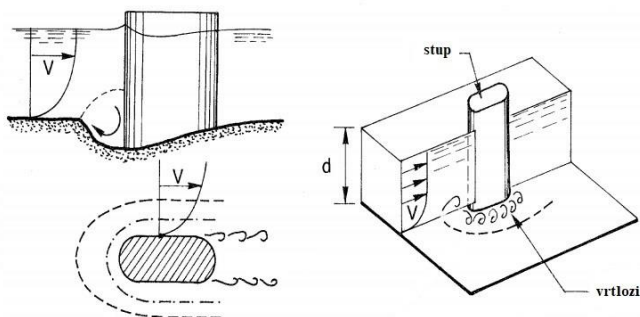
Abstract

The flow in natural watercourses over the erodible riverbed can cause the appearance of scour holes next to structures built in the river, most commonly next to bridge elements. Since scouring next to the bridge piers and abutments can significantly alter the design loading, and consequently present a risk to bridge safety, it is important to carry out the periodical monitoring and record changes of the riverbed. This paper presents an overview of the instrumentation used to monitor scour processes with discussion of advantages and disadvantages for every instrument type, as well as their applicability for deployment during the flood waves.

Keywords: local scour, bridge, monitoring, scour hole, R3PEAT

1. Uvod

Podlokavanje oko stupova mostova prirodan je fenomen uzrokovan erozivnim djelovanjem toka rijeke koji je vrlo opasan jer je to jedan od najčešćih uzroka otkazivanja mostova u svijetu [1]. Dubina kaverne nastale podlokavanjem određuje se zbrajanjem individualnih dubina podlokavanja nastalih mehanizmima erozije – globalnom erozijom, erozijom uslijed koncentracije toka i lokalnom erozijom [2]. Tijekom rastuće faze hidrograma povećavaju se dubina i brzina toka te opstrujavanjem stupa mosta nastaju dva sustava vrtloga: vrtlozi s vodoravnom osi i vrtlozi s vertikalnom osi [3].



Slika 1. Proces podlokavanja oko stupa i nastanka kaverne (prilagođeno iz [3])

Postoje mnoge zaštite stupa od podlokavanja, a u Republici Hrvatskoj najčešće je korištena riprap zaštita (kameni nabačaj). Međutim, u praksi se pokazalo kako izgradnja riprap zaštite ne sprječava eroziju u potpunosti, nego dolazi do pojave podlokavanja na nizvodnoj nožici riprapa te nastaje odbačena kaverna u koju se riprap počinje urušavati [4]. Zbog važnosti toga problema potrebno je pratiti procese podlokavanja uz mostove kako bi se moglo pravovremeno djelovati u izvanrednim situacijama. Razvoj podlokavanja može se pratiti fiksnom instrumentacijom, prijenosnom instrumentacijom ili vizualnim praćenjem [5]. Uzimajući u obzir važnost problema podlokavanja, velik broj instrumenata razvijen je za praćenje nastanka kaverne uzrokovan podlokavanjem, koji se mogu svrstati u sljedeće kategorije: uređaji za jednokratnu upotrebu, pulsni ili radarski uređaji, uređaji koji koriste zvučne valove, svjetlovodne rešetke i uređaji koji koriste električnu vodljivost [6].

2. Pregled najčešće korištenih uređaja za praćenje podlokavanja

2.1. Uređaji za jednokratnu upotrebu

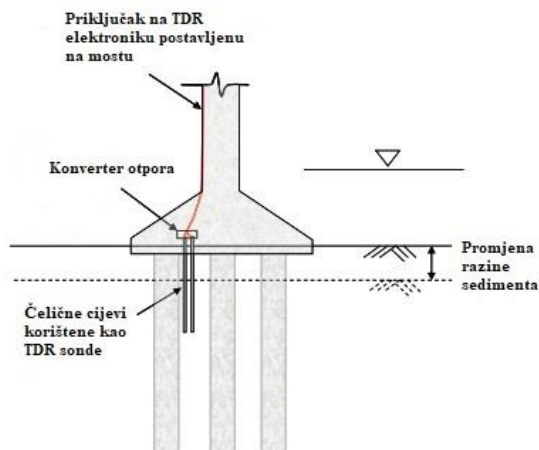
Briaud i dr. [5] opisali su isplivavajući uređaj (engl. *float-out device*), cilindrični uređaj za praćenje koji se zakopa vertikalno u korito. Uređaj ispliva kada dubina podlokavanja dođe do razine na kojoj je zakopan te šalje signal vrijednosti 1 prema prijammiku, a dok je zakopan, šalje vrijednost 0. Kompaktan je i jednostavan za korištenje, ali ima ograničeno vrijeme rada jer se napaja preko baterije. Nedostatak mu je to što pokazuje lokalno podlokavanje samo na mjestu na kojem je postavljen. Također, proces njegova postavljanja na terenu zahtijeva bušenje, zbog čega je skup i zahtjevan za postavljanje. Briaud i dr. [5] također su opisali privezanu zakopanu sklopku TBS (engl. *Tethered buried switch*), tip uređaja za isplivavanje koji je vertikalno zakopan u tlo kako bi informirao o razvoju kaverne oko temelja mosta. Električna sklopka aktivira se kada se

šipka okrene iz vertikalnoga položaja u horizontalni, što se dogodi kada dubina podlokavanja dosegne dubinu ukopavanja uređaja i tako daje izravnu i jednostavnu indicaciju dubine podlokavanja. Ovaj je uređaj jeftin i jednostavan za postavljanje, nema ograničeno vrijeme rada jer je izravno kabelom spojen na sustav za prikupljanje podataka. Nedostaci su mu to što može izmjeriti dubinu podlokavanja samo do dubine na koju je ukopan, daje samo informacije o lokalnome podlokavanju i zahtijeva konstantan spoj na izvor napajanja.

Sustavi zakopanih ili utisnutih šipki uključuju sustave kao što su magnetski klizni prsten, tzv. *Scubamouse* i Wallingdordov *Tell-Tail* uređaj. Ovi instrumenti rade na principu ručne ili automatske gravitacijske sonde koja je oslonjena na korito i pomiče se prema dolje kada se razvija kaverna nastala podlokavanjem [6]. *Tell-Tail* temelji se na upotrebi senzora postavljenih na fleksibilan gumeni rep i ugrađuju se ispod korita. Ako dubina podlokavanja dosegne dubinu senzora, isti počinje oscilirati i slati signal [3].

2.2. Pulsni ili radarski uređaji

Pulsni ili radarski uređaji koriste radarske signale i elektromagnetske valove kako bi odredili promjene u svojstvima materijala koje se javljaju kada se signal propagira kroz promjenjivi fizički medij [7]. Metoda reflektometra vremenske domene TDR (engl. *Time Domain Reflectometry*) originalno je korištena u elektrotehnici za lociranje diskontinuiteta u dalekovodima električne i komunikacijske mreže, a također može mjeriti dielektrična i električna svojstva materijala [8]. U građevinarstvu je primjenjivana za mjerenje sadržaja vode u tlu, mjerenja gustoće, procjenu čvrstoće betona i monitoring podlokavanja na mjestima mostova [9]. TDR radi tako da na mjerni senzor šalje brzorastući impuls i mjeri refleksije zbog promjene geometrije sustava ili dielektrične propusnosti materijala te rezultate mjerenja temelji na velikoj razlici između dielektrične konstante vode i zraka ili nanosa [10].



Slika 2. Shema integriranoga TDR sustava za monitoring podlokavanja (prilagođeno iz [10])

Anderson i dr. [11] predstavili su GPR (engl. *Ground Penetrating Radar*), radar za promatranje ispod površine zemlje, uređaj koji obično koristi kombinaciju antene odašiljača i prijarnika koji je postavljen na površinu vode ili neposredno iznad površine vode. Odašiljač proizvodi kratkotrajan (raspon frekvencija u MHz) impulsi

elektromagnetski signal u jednakim vremenskim ili prostornim razmacima dok se pomiče iznad ili ispod površine vode. Daje precizan strukturalni model nanosa na dnu korita te pruža kontinuiranu sliku korita na odabranoj trasi, a nedostatak mu je što podatci mogu sadržavati šumove zbog više različitih refleksija signala.

2.3. Svjetlovodna rešetka

Hill i Meltz [12] eksperimentalnim putem dokazali su kako FBG (engl. *fiber-Bragg grating*), senzor svjetlovodne rešetke, ima izvrsnu pouzdanost za mjerenje deformacije i temperature, pri čemu je utvrđeno da pomak Braggove valne duljine ima linearan odnos s osnom deformacijom. Senzorski sustavi zasnovani na svjetlovodnoj rešetci temeljeni su na mjerenju osnih deformacija ugrađenih konzolnih šipki za generiranje električnih signala koje ukazuju na pojavu podlokavanja duž šipke [13]. Nedostatak ovih senzora jest osjetljivost na vibracije konstrukcije mosta uzrokovane tokom vode ili prometom koji se odvija na mostu, zbog čega neke recenzije učinkovitosti pokazuju malu razliku između ukopanih i ovoga tipa senzora [14].

2.4. Uređaji na bazi zvučnih valova

Nassif i dr. [15] predstavili su jeftin sonički sustav (engl. *Fathometer*), sonarni sustav praćenja podlokavanja koji se sastoji od sonarnoga instrumenta povezana s uređajem za pohranu podataka i napajanjem koji može davati neprekidan zapis dubine podlokavanja. Mjeri dubinu na temelju vremena putovanja zvučnoga vala kroz vodu. Može se programirati kako bi mjerio dubinu u određenim vremenskim koracima (primjerice svakih 60 min) te može pratiti procese podlokavanja kao i zapunjavanja kaverne nanosom.

Fisher i dr. [16] pokazali su kako promjena temperature kod sonarnih uređaja može rezultirati greškom do 6 % kada je riječ o procjeni dubine korita. Ovisnost o temperaturi može se izračunati na terenu mjerenjem temperature i računanjem promjene brzine zvuka. Koncentracija suspendiranih čestica minimalno utječe na rezultate mjerenja u mirnome toku, dok za turbulentne tokove može uzrokovati bitnu pogrešku, ali se također može utvrditi pouzdanost srednjih mjernih rezultata izračunom standardne devijacije.

Akustični dubinomjeri (engl. *Echo sounders*) koriste izvor akustičnoga signala i prijamnik, a postavljeni su neposredno ispod površine vode. Akustični dubinomjeri emitiraju zvučni impuls frekvencije u rasponu od oko 100 kHz-a od kojih se neki reflektiraju na dnu kanala i vraćaju u prijamnik gdje se digitalno pohranjuju [11]. S obzirom na to da su unutar jednoga uređaja smješteni izvor signala i prijamnik, omogućeno je neometano praćenje podlokavanja pomoću takva uređaja. Glavna prednost takvih dubinomjera je ta što uređaj daje točan model batimetrije korita, a glavni je nedostatak šumovitost zapisa zbog višestruke refleksije impulsa od dna korita, obale i/ili stupova mosta [11].

2.5. Uređaji na bazi električne vodljivosti

Anderson i dr. [11] za praćenje podlokavanja primijenili su sonde za mjerenje električne vodljivosti između dviju elektroda uronjenih u vodu. Upotreba takvih sonda za mjerenje dubine dna rijeke temelji se na načelu da se vodljivost korita i vode razlikuju zbog svojstava suspendiranih čestica nanosa, otopljenih iona i vode, koji utječu na vodljivost. Višestruki senzori postavljaju se na sondu koja se okomito utiskuje u korito na željenome mjestu i ostavlja radi periodičnoga praćenja podlokavanja. Ova metoda daje dobre rezultate samo ako se električna vodljivost korita i vode bitno razlikuju [17].

Glavna je prednost mjerenja podlokavanja sondama za mjerenje električne vodljivosti mogućnost dugotrajna praćenja, dok su glavni nedostaci mogućnost prikupljanja podataka samo na mjestu sonde i potencijalan utjecaj na navigacijske sustave prolazećih brodova [11].

3. Rasprava

Brojni su mostovi u Republici Hrvatskoj specifični po postavljenoj zaštiti stupa od podlokavanja, odnosno riprapi oblozi zbog koje se kaverna ne formira neposredno uz stup mosta, nego je propagirana nizvodno. Zbog toga se većina prethodno opisanih instrumenata za praćenje podlokavanja ne može upotrijebiti na takvim mostovima jer su fiksno vezani za most ili izvor napajanja postavljen na samome mostu. S druge strane neki od navedenih instrumenata mogu biti postavljeni na proizvoljnome mjestu u vodotoku, pri čemu je potrebno poznavati točno mjesto nastanka kaverne, što nije moguće unaprijed odrediti. Kako bi se mogli pratiti procesi razvoja kaverne nastale podlokavanjem, mjerni instrument trebao bi biti postavljan iznad same kaverne, te su u skladu s tim prikladni akustični dubinomjeri s vlastitim napajanjem postavljeni na plutaču. U sklopu projekta R3PEAT (*Daljinsko praćenje erozije riprapi zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu*) razvija se sustav praćenja podlokavanja koji će se moći postaviti iznad kaverne i prikupljati podatke o dubini u stvarnome vremenu za vrijeme nailaska vodnoga vala [18, 19].

4. Zaključak

U ovome radu dan je pregled uređaja koji se koriste za praćenje podlokavanja oko stupa mosta. Prikazani su nedostaci i glavne prednosti pojedinih uređaja iz kojih se može razaznati prikladnost uređaja u odnosu na specifičnosti pojedinih lokacija na terenu. Valja napomenuti kako se uređaji koji su fiksno vezani za most ne mogu koristiti na mostovima koji su zaštićeni riprapi zaštitom od podlokavanja, kakvi su česti u Hrvatskoj, zbog pojave odbačene kaverne dalje od mosta. Zakopani ili utisnuti uređaji također nisu pogodni za takve mostove jer mjere dubinu samo na mjestu na kojem su postavljeni, a pozicija odbačene kaverne prije nastanka nije poznata.

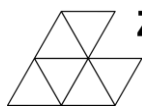
Zahvala

Ovaj je rad sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom R3PEAT (UIP-2019-04-4046).

Literatura

- [1] Lee, G., Mohan, S.B., Huang, C., Fard, B.N.: A Study of U.S. Bridge Failures (1980-2012), University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, 2013
- [2] Briaud, J.L., Chen, H.C., Li, Y., Nurtjahyo, P., *et al.*: SRICOS-EFA Method for Contraction Scour in Fine-Grained Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131** (2005) 10, pp. 1283-1294
- [3] De Falco, F., Mele, R.: The monitoring of bridges for scour by sonar and sediment, *NDT & E International*, **35** (2002) 2, pp. 117-123
- [4] Gilja, G., Kuspilić, N., Tečić, D.: *Morphodynamic impact of scour countermeasures on riverbed topography*, 2017
- [5] Briaud, J., Hurlbaus, S., Chang, K.-A., Yao, C., *et al.*: Realtime Monitoring of Bridge Scour Using Remote Monitoring Technology, 2011

- [6] Prendergast, L.J., Gavin, K.: A review of bridge scour monitoring techniques, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **6** (2014) 2, pp. 138-149
- [7] Forde, M.C., McCann, D.M., Clark, M.R., Broughton, K.J., *et al.*: Radar measurement of bridge scour, *NDT & E International*, **32** (1999) 8, pp. 481-492
- [8] Ramo, S., Whinnery, J.R., Van Duzer, T.: *Fields and Waves in Communication Electronics*, Wiley, 1994
- [9] Yankielun, N.E., Zabilansky, L.: Laboratory Investigation of Time-Domain Reflectometry System for Monitoring Bridge Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, **125** (1999) 12, pp. 1279-1284
- [10] Yu, X., Yu, X.: Time Domain Reflectometry Automatic Bridge Scour Measurement System: Principles and Potentials, *Structural Health Monitoring*, **8** (2009) 6, pp. 463-476
- [11] Anderson, N.L., Ismael, A.M., Thitimakorn, T.: Ground-Penetrating Radar: A Tool for Monitoring Bridge Scour, *Environmental and Engineering Geoscience*, **13** (2007) 1, pp. 1-10
- [12] Hill, K.O., Meltz, G.: Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview, *Journal of Lightwave Technology*, **15** (1997) 8, pp. 1263-1276
- [13] Lin, Y.B., Lai, J.S., Chang, K.C., Li, L.S.: Flood scour monitoring system using fiber Bragg grating sensors, *Smart Materials and Structures*, **15** (2006) 6, 1950-1959
- [14] May, R.W.P., Ackers, J.C., Kirby, A.M., Research, C.I., *et al.*: *Manual on Scour at Bridges and Other Hydraulic Structures*, CIRIA, 2002
- [15] Nassif, H., Ertekin, A.O., Davis, J.: Evaluation of bridge scour monitoring methods, Trenton, USA, pp. 1-89, 2002
- [16] Fisher, M., Chowdhury, M.N., Khan, A.A., Atamturktur, S.: An evaluation of scour measurement devices, *Flow Measurement and Instrumentation*, **33** (2013) pp. 55-67
- [17] Hayes, D.C., Drummond, F.E.: Use of fathometers and electrical-conductivity probes to monitor riverbed scour at bridge piers, 1995
- [18] Gilja, G., Harasti, A., Potočki, K., Varga, M., *et al.*: Istraživački okvir projekta R3PEAT - daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu, *OKRUGLI STOL: Nanos u vodnim sustavima - stanje i trendovi*, Varaždin, 2020
- [19] Harasti, A., Gilja, G., Varga, M., Fliszar, R.: ScourBuoy – concept for scour monitoring system, *EGU General Assembly 2021*, Beč, Austrija, 2021



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.06>

LABORATORIJSKA ISPITIVANJA KOLOSIFEČNOGA PRIBORA

LABORATORY TESTING OF THE FASTENING SYSTEM

Mate Ivančev¹, Ivo Haladin¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, mate.ivancev@grad.unizg.hr; ivo.haladin@grad.unizg.hr

Sažetak

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu surađuje s tvrtkom DIV d.o.o. na istraživačkome projektu *Razvoj DIV sustava elastičnog pričvršćivanja*. Radi razvoja novoga sustava pričvršćivanja ovaj rad predstavlja laboratorijska mjerenja svojstava sustava pričvršćivanja. Bitna procjena sustava pričvršćivanja tračnica zahtijeva razumijevanje njegove geometrije, materijala, mehaničkih svojstava i kompatibilnosti pritiskalice i podtračničke podloške. Ispitivanja na W-14 kolosiječnome priboru provela su se u Laboratoriju za tehničku mehaniku Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu prema normama iz seta 13481. Ispitne metode za W-14 pričvršni sustav primijenit će se za ispitivanja novoga DIV sustava pričvršćenja. Radi razvijanja novoga DIV sustava pričvršćenja te njegove optimizacije i povećane konkurentnosti na tržištu, kolosiječni pribor potrebno je testirati i na provodljivost električne energije te ispitati prigušivanje udarnoga opterećenja. U ovome radu predstavljene su norme koje definiraju ta ispitivanja kao i razvijanje potrebne mjerne opreme neophodne za proces ispitivanja.

Ključne riječi: željeznički kolosijek, sustav pričvršćenja, laboratorijska ispitivanja sustava pričvršćenja

Abstract

The Faculty of Civil Engineering of the University of Zagreb cooperates with the company DIV d.o.o. on the research project "Development of the DIV elastic fastening system". To develop a new fastening system, this paper presents laboratory measurements of the characteristics of fastening systems. Significant assessment of the rail fastening system requires an understanding of its geometry, material, mechanical properties, and compatibility of the clip and rail pad. Tests on W-14 track accessories were performed in the Laboratory for Technical Mechanics of the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, according to the standards from set 13481. Test methods for W-14 fastening system will be applied for testing the new "DIV" fastening system. To develop a new "DIV" fastening system and its optimization and increased market competitiveness, fastening system need to be tested for electrical conductivity and shock load damping. This paper presents the standards that define these tests and the development of the necessary measuring equipment.

Keywords: railway track, fastening system, laboratory tests of fastening system

1. Uvod

Dinamičke sile koje djeluju na kolosijek znatno su se povećale posljednjih desetljeća zbog povećanja brzina željezničkih vozila i razvoja brzih željeznica [1]. Slijeganje pojedinih slojeva i degradacija kolosiječne konstrukcije problemi su koji se javljaju na modernim željezničkim prugama. Kako bi se smanjile dinamičke sile i poboljšala kvaliteta kolosijeka, obično se ugrađuje elastični sustav pričvršćivanja za spajanje tračnica i pragova. Pričvršćenje tračnica podrazumijeva i uključuje sve komponente koje čine strukturnu povezanost između tračnice i praga. Diljem svijeta koristi se velik broj različitih pričvršćenja kojima se redovno dodaju novi tipovi kako bi se pratile potrebe i mišljenja ili zbog dostupnosti novih materijala. Izbor pričvršćenja također uvelike ovisi o vrsti i svojstvima pragova na koje se oni ugrađuju. Sustav pričvršćenja trebao bi biti dimenzioniran i izveden tako da sustav kolosijeka bude funkcionalan uslijed svih nepovoljnih dinamičkih opterećenja i vanjskih uvjeta.

Glavne funkcije sustava za pričvršćivanje su: prijenos sila s tračnica na prag, osiguravanje stalne sile pričvršćenja tijekom vremena, nepromjenjivo elastično ponašanje tijekom vremena te trajnost svih elemenata, niska cijena i jednostavnost ugradnje i održavanja [2]. Štoviše, sustav pričvršćivanja trebao bi osigurati i udobnost putnika, prigušivanje vibracija i udarnih opterećenja uzrokovanih željezničkim prometom, održavanje kolosijeka u određenim tolerancijama, pružanje električne izolacije između tračnica i pragova, torzijski otpor prevrtanju tračnica, ograničenje protiv uzdužnih pomicanja tračnica [3].

Prema [2], [4] sustav pričvršćenja tračnica također trebaju karakterizirati jednostavna montaža, održavanje i demontaža, sprječavanje abrazije među komponentama, odgovarajuća otpornost od korozije, razumna cijena, životni vijek trajanja kompatibilan s pragom te otpornost na vandalske radnje.

Elastične karakteristike pričvršćenja, osim u razdoblju montaže i eksploatacije, moraju biti održane čak i nakon operacija održavanja i demontaže. Provjera pričvršćne sile pribora mora biti uvijek jednostavno izvediva na kolosijeku bez demontaže [4].

Demontaža i zamjena pričvršćenja operacije su koje moraju biti učinjene brzo mehaničkim putem, eventualno automatski, što je posebno važno za oslobađanje naprezanja u kontinuirano zavarenim tračnicama. Brzina je prijeko potrebna jer promet mora biti zaustavljen. Međutim, alat za demontiranje potreban je kako bi se izbjegli eventualna sabotaža i neovlašteno uklanjanje pričvršćenog pribora.

Razvoj projekta „DIV“ elastičnoga sustava za pričvršćivanje sastoji se od dvije faze: industrijski razvoj pritiskalice i eksperimentalni razvoj. Industrijski razvoj podijeljen je na razvoj modela pritiskalice, razvoj alata za proizvodnju elemenata sustava za pričvršćivanje „DIV“, unutarnja ispitivanja eksperimentalnih serija, laboratorijska ispitivanja, razvoj postupaka i strojeva za montažu i demontažu kopče „DIV“, izrada pokusne dionice (glavni projekt duljine ispitne sekcije 200 m – referentna dionica 100 m sa sustavom učvršćenja W-14 i dionica od 100 m sa sustavom za pričvršćivanje „DIV“) i zaštitu intelektualnoga vlasništva. Koraci eksperimentalnoga razvoja su: izgradnja ispitnoga dijela i ugradnja mjerne opreme, ispitivanje elastične pritiskalice „DIV“ na ispitnome dijelu i priprema za komercijalizaciju

Jedan od najvažnijih elemenata razvoja novoga sustava pričvršćenja jest njegovo laboratorijsko ispitivanje prema prihvaćenim normama. Kako bi se mogla provesti ispitivanja na novome sustavu, potrebno je na sustavima koji su već u primjeni razviti metode ispitivanja koje su u skladu s normama.

Tablica 1. Ispitivanja kolosiječnoga pribora prema CEN-u i AREMA-i [5]

<i>Ispitivanje</i>	<i>CEN</i>	<i>AREMA</i>	<i>Ispitivanje</i>	<i>CEN</i>	<i>AREMA</i>	<i>Ispitivanje</i>	<i>CEN</i>	<i>AREMA</i>
<i>Uzdužni otpor tračnice</i>	DA	DA	<i>Mokri i abrazivni okoliš</i>	NE	DA	<i>Lateralni otpor</i>	NE	DA
<i>Torzija</i>	DA	DA	<i>Pričvrсна sila</i>	DA	DA	<i>Odizanje tračnice</i>	NE	DA
<i>Prigušenje udarnoga opterećenja</i>	DA	DA	<i>Izvlačenje podloške</i>	DA	DA	<i>Procjena dimenzija</i>	DA	NE
<i>Električni otpor</i>	DA	DA	<i>Dinamička krutost podtračničke podloške</i>	DA	NE			
<i>Utjecaj nepovoljnog okoliša</i>	DA	NE	<i>Vertikalna krutost</i>	DA	DA			

Prema [5] postoje razlike u ispitivanjima kolosiječnoga pribora u Europi i SAD-u. U Tablici 1 prikazana su potrebna ispitivanja prema europskome setu normi koje su definirali CEN (Europa) i AREMA (Sjedinjene Američke Države).

2. Dosadašnja laboratorijska ispitivanja kolosiječnoga pribora

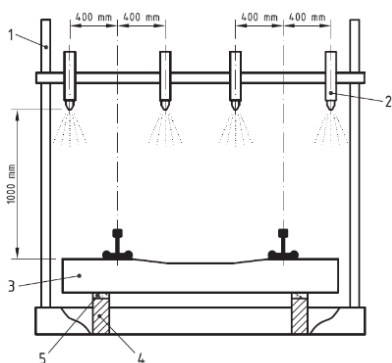
Laboratorij za tehničku mehaniku Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu do sada je za postojeći W-14 sustav pričvršćenja radio na određivanju pričvršne sile kolosiječnoga pribora, određivanju otpora uzdužnomu pomicanju tračnice, određivanju statičke krutosti, utjecaju ponavljanja opterećenja te određivanju otpora zakretanju tračnica. Također je proveo ispitivanje pod opterećenjem otpora na izvlačenje te se istražio utjecaj nepovoljnih uvjeta okoliša. Ispitivani pričvršni pribor spada u kategoriju C s maksimalnim projektiranim osovinskim opterećenjem od 260 kN i minimalnim radijusom zakrivljenosti kolosijeka od 150 m te je u primjeni na pragovima tipa B70. Ispitivanja na kolosiječnome pričvršnom priboru za jednodijelne prednapete betonske pragove provedena su prema zahtjevima CEN-ovih europskih normi [6] i [7].

3. Buduća ispitivanja kolosiječnoga pribora

U sklopu potvrde laboratorijskih svojstava kolosiječnoga pribora prema [6] i [7] za novi „DIV“ sustav pričvršćenja potrebno je napraviti i ispitivanje električnoga otpora kolosiječnoga pričvršnog pribora te ispitivanje prigušivanja udarnoga opterećenja kolosiječnoga pribora.

3.1. Ispitivanje električnoga otpora

Za ispitivanje električnoga otpora potreban je uređaj prema normi HRN EN 13146-5:2012 koji mjeri električni otpor u pričvršnome priboru prilikom puštanja električne energije kroz tračnicu. U nastavku je prikazan pregled izrađene tehničke specifikacije za izradu i montažu opreme za mjerenje električnoga otpora koja se sastoji od opreme za prskanje, izvora električne energije te instrumenta za mjerenje napona i rezultante izmjenične struje.



Slika 1. Skica opreme za prskanje

Oprema za prskanje

Okrvir koji je napravljen prema Slici 1 potrebno je montirati na „kadu“, to jest spremnik za vodu (kao na Slici 2). Slika 3 drukčija je inačica traženoga okvira (nedostaje spremnik za vodu u koji bi se voda mogla skupljati), ali je dobar primjer kako bi prskalice trebale izgledati. Radi lakšega manevriranja spremnik treba biti na kotačima. Treba uzeti u obzir kako će se u „kadi“, tj. spremniku za vodu, nalaziti betonski prag od otprilike 250 kg zbog čega taj spremnik mora biti odgovarajuće nosivosti.

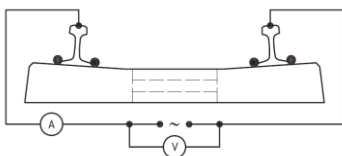
Na okvir je potrebno montirati četiri prskalice. Vrh prskalice treba biti udaljen 100 cm od vrha praga (Slika 1). Prskalice promjera 3,6 mm udaljene su 40 cm na lijevu i desnu stranu od svake osi tračnice. Kut je prskanja $100^\circ - 125^\circ$, a protok vode kroz svaku prskalicu mora biti 7 ± 1 litara/min. Svaka prskalice treba biti postavljena tako da se može pomicati po nosaču (lijevo/desno, usporedno s betonskim pragom).



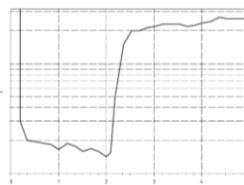
Slika 2. Oprema za prskanje s okvirom, spremnikom i pumpom za vodu



Slika 3. Oprema za prskanje s okvirom i instrumentima za napajanje/mjerenje



Slika 4. Strujni krug



Slika 5. Rezultati mjerenja prikazani kao krivulja otpor – vrijeme

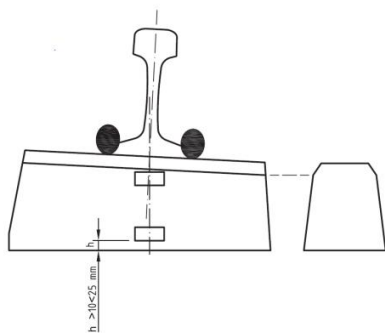
Oprema mora uključivati sredstva za kontrolu i mjerenje protoka vode u svakoj prskalici (pumpa za vodu sa satovima za svaku prskalicu).

Izvor električne energije

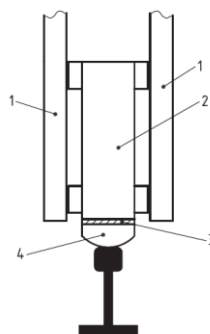
Izvor električne energije (izmjenična struja, AC) mora imati sljedeće karakteristike: napon (30 ± 3) RMS i frekvencije (50 ± 15) Hz. Izmjenična struja kreće se strujnim krugom od izvora električne energije do pričvrsnoga pribora na betonskome pragu (Slika 4). Instrumenti za mjerenje napona i rezultante izmjenične struje moraju imati točnost 1 %, dopuštati izračun otpora u rasponu od 1×10^2 do $1 \times 10^6 \Omega$, oprema mora imati mogućnost ispisa zapisa o izračunatom otporu u vremenu, kalibracija instrumenata mora biti obavljena prema EU standardima (SI jedinice).

3.2. Određivanje prigušivanja udarnoga opterećenja kolosiječnoga pribora

Norma HRN EN 13146-3:2012 definira ispitne metode za određivanje prigušivanja udarnoga opterećenja za kolosiječni pričvrсни pribor. Za takvo ispitivanje potrebno je modelirati uređaj prema parametrima ispitivanja definiranim u normi. Nakon određivanja parametara i samoga procesa modeliranja potrebno je izraditi modificirani uređaj koji će biti prilagođen propisanomu laboratorijskom ispitivanju definiranom normom. U nastavku je dan pregled izrade i montaže takva uređaja. Ispitivanje se provodi na betonskome pragu bez pukotina koji je u nemodificiranome stanju u odnosu na tvorničko stanje. Na dva mjesta širine od 100 mm do 120 mm na betonskome pragu mjerit će se naprezanja tijekom ispitivanja (Slika 6). Pozicije se nalaze paralelno bazi praga. Jedna je pozicija što bliže vrhu praga (na najvišoj točki na kojoj nema zaobljenja), dok se druga mjerna pozicija nalazi na udaljenosti od 10 mm do 25 mm poviše baze praga.



Slika 4. Pozicije na kojima se mjeri naprezanje praga prema HRN EN 13146-3:2012



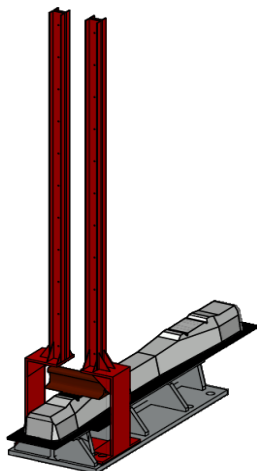
Slika 5. Tipična udarna masa (bat)

- 1 - vodiči
- 2 - bat,
- 3 - gumena podloška,
- 4 - glava bata

Postoje dvije metode mjerenja naprezanja na pragovima radi definiranja prigušenja udarnoga opterećenja kolosiječnoga pribora: referentna metoda i alternativna metoda. Primjena referentne metode zahtijeva zastornu prizmu koja se sastoji od kamena drobljenca granulometrijskoga sastava od 5 mm do 15 mm. Zastor mora biti kontinuiran na cijeloj duljini praga. Podloga mora dopustiti vertikalnu deformaciju praga ($0,1 \leq d \leq 0,5$ mm) kada se poveća statičko opterećenje s 50 kN na 60 kN na ležajnome tračničkom mjestu. Alternativna metoda zahtijeva gumenu podlogu na čvrstoj podlozi. Kada se statičko opterećenje poveća s 50 kN na 60 kN, treba biti dopuštena vertikalna deformacija raspona od 0,1 mm do 0,5 mm. Potrebna duljina tračnice za ispitivanje udarnoga prigušenja jest od 0,3 m do 1,0 m. Udarna masa (bat) mora biti takva da kombinacijom mase i visine ispuštanja na svakoj mjernoj poziciji naprezanja praga budu manja od 80 % izračunate točke pucanja betonskoga praga. Vremenski interval inicijalnoga impulsa treba biti od 1 ms do 5 ms. Za ispitivanje je potreban set opruga s ukupnom totalnom krutošću manjom od 2 MN/m i s mogućnošću primjene vertikalnoga predopterećenja na tračnicu od 50 kN (Slika 7).

Procedura ispitivanja prigušivanja udarnoga opterećenja

Ispitivanje se provodi na sobnoj temperaturi, 23 ± 5 °C. Sve korištene komponente drže se na toj temperaturi barem četiri sata prije ispitivanja. Pričvrсни sustav i tračnica povezani su referentnim podtračničkim podloškom debljine 5 mm, izrađenim od HDPE ili EVA materijala.



Slika 6. Model uređaja za ispitivanje udarnoga prigušenja kolosiječnoga pribora

Statička krutost referentne podloške prema normi HRN EN 13146-9:2020 ne smije biti manja od 500 MN/m. Udarno opterećenje nanosi se na tračnicu slobodnim padom bata te se mjeri naprezanje u razdoblju ne manjemu od 3 ms prije udara kontinuirano do barem 5 ms poslije udara. Za utvrđenu ispitnu opremu veličina i vremenski interval prvoga maksimuma naprezanja moraju biti u usporedbi s prosjekom od 10 prethodnih utjecaja. Kada pet uzastopnih mjerenja imaju vršnu veličinu i vremenske intervale u odnosu na prvo naprezanje unutar $\pm 10\%$ njihove srednje vrijednosti, priprema je završena. S postavljenim testnim podloškom izvodi se pet udaraca. Zatim se snima naprezanje za tri sljedeća udarca. Procedura ispitivanja za alternativnu metodu razlikuje se jer je za podlogu postavljena gumena podloška. Prigušivanje udara sustava pričvršćivanja procjenjuje se usporedbom naprezanja koja nastaju mjerenjem s referentnom podtračničkom podloškom i mjerenjem s testnom podtračničkom podloškom.

Model uređaja na kojem će se raditi ispitivanje prikazan je na Slici 8.

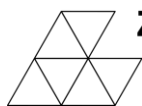
4. Daljnja rasprava

Buka i vibracije nastale prometovanjem željezničkih vozila prepoznate su kao problem u naseljenim područjima. Sustavno rješavanje toga problema započinje detekcijom izvora, određivanjem intenziteta i mehanizama širenja buke i vibracija. Uloga kolosijeka u emisiji buke i vibracija predmet je mnogih istraživanja, kao što je i utjecaj elastičnoga pričvršćenja na vibroakustička svojstva željezničkoga sustava.

Stoga je, osim potrebnih mehaničkih karakteristika koje novi „DIV“ sustav pričvršćenja treba imati, potrebno optimizirati njegova vibroakustička svojstva. Vibroakustički parametri definirat će se laboratorijskim i terenskim ispitivanjima prema standardima u svezi s ispitivanjem vibroakustičkih svojstava kolosiječnoga pribora.

Literatura

- [1] Lakušić, S., Bartoš, D., Bajić, G.: „Analiza elastičnih pritiskalica za pričvršćenje tračnica,“ // ŽELJEZNICE 21 7 (2008.), 3;7-12
- [2] Esveld, C.: Modern Railway Track, 2nd ed. Zaltbommel: MRT Productions, 2001.
- [3] Kraskiewicz, C., Oleksiewicz, W., Pładowska-Zagrajek, M., Lipko, C.: „Overview of vibroacoustic isolators used in railway tracks,“ MATEC Web Conf., vol. 219, no. October, 2018
- [4] V. A. Profillidis, Railway Management and Engineering, 3. Taylor & Francis Group, 2017.
- [5] Rhodes, D.,; Coats, B.: Laboratory test standards for assessment of rail fastening system performance
- [6] „Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Ispitne metode za kolosiječni pričvrtni pribor - Dijelovi 1 - 9: (HRN EN 13146-1:2019; HRN EN 13146-2:2012; HRN EN 13146-3:2012; HRN EN 13146-4:2020; HRN EN 13146-5:2012/Ispr.1:2017; HRN EN 13146-6:2012; HRN EN 13146-7:2019; HRN EN 13146-8:2012; HRN EN 13146-9:2020)“
- [7] „Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izradbu kolosiječnog pričvrstnog pribora - Dijelovi 1 - 7: (HRN EN 13481-1:2012; HRN EN 13481-2:2017; HRN EN 13481-3:2012; HRN EN 13481-4:2012; HRN EN 13481-5:2017; HRN EN 13481-7:2012)“



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.07>

POSTAVLJANJE OPREME ZA MONITORING NA MOSTU VRANDUK 1

MONITORING EQUIPMENT INSTALLATION ON VRANDUK 1 BRIDGE

Marino Jurišić¹, Radoslav Markić²

(1) Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, Matice hrvatske b.b., Mostar, marino.jurismic@gf.sum.ba

(2) Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, Matice hrvatske b.b., Mostar, radoslav.markic@gf.sum.ba

Sažetak

Ovaj rad prikazuje postavljanje opreme za monitoring na mostu Vranduk 1 i predstavlja dio ispitivanja koja se rade u sklopu doktorskog rada. Na početku rada prikazane su osnovne informacije o mostu. Na most je postavljeno ukupno osam traka za mjerenje relativnih deformacija, i to pet traka na beton i tri trake na čelik. Četiri trake postavljene su na beton u unutarnjim rubovima poprečnoga presjeka, a jedna traka postavljena je za kompenzaciju temperaturnih promjena na kocku dimenzija 15 x 15 x 15 cm. Dvije trake su postavljene na žice u kablovima na prednapinjanje, a jedna je postavljena na komad žice za prednapinjanje dužine cca 5cm za kompenzaciju temperaturnih promjena. Zatim su sve trake nastavnim kablovima spojene u mjerni uređaj koji se nalazi u baznom segmentu mosta. Obzirom da se monitoring radi za fazu gradnje planirano trajanje je četiri mjeseca.

Ključne riječi: monitoring, mostovi, relativne deformacije, slobodno konzolna gradnja

Abstract

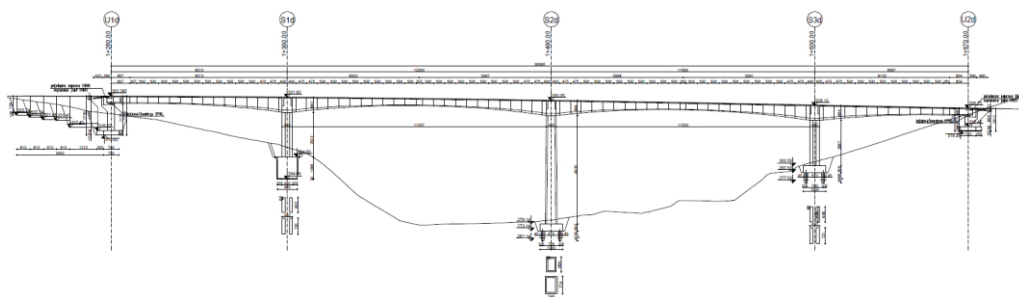
This paper presents monitoring equipment installation on Vranduk 1 bridge which is a part of a series of measurements that are being conducted for a doctoral thesis. Firstly, basic information about the bridge are shown. Total of eight strain gauges are installed on the bridge, five on concrete and three on steel. Four gauges are installed on concrete on edges inside the superstructure cross-section, and one gauge is installed on a concrete cube measuring 15x15x15cm for temperature compensation. Two gauges are installed on wires in prestressing cables, and one is installed on a piece of prestressing wire roughly 5cm long to compensate temperature. All strain gauges are inside the pierhead connected to measuring device using connecting cables. The monitoring will take place in construction phase over the course of four months.

Keywords: monitoring, bridges, strain, balanced cantilever construction

1. Uvod

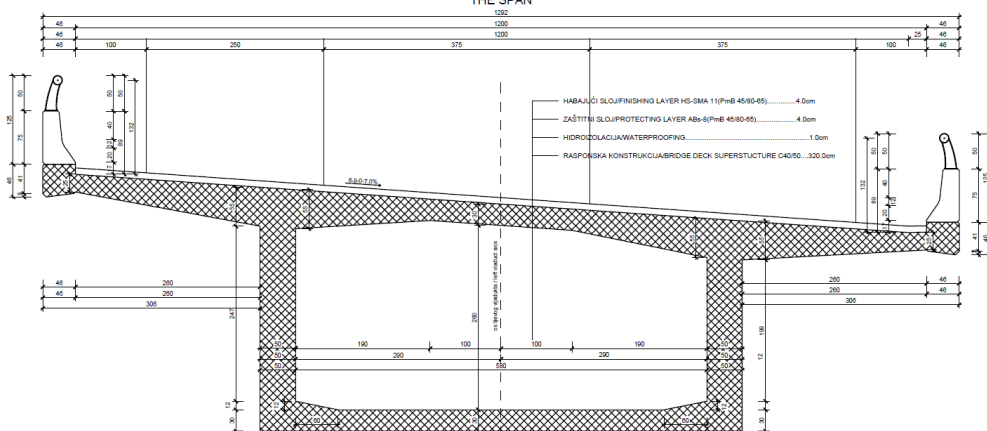
Most Vranduk 1 gradi se na autocesti koridora Vc, dionica Poprikuše – Zenica Sjever (Donja Gračanica), poddionica Vranduk – Ponirak. Trasa poddionice počinje u dolini rijeke Bosne koliko to dopuštaju tehnički elementi kao i uvjeti na terenu jer dolinu rijeke gotovo u potpunosti zauzimaju postojeća cesta Doboj – Zenica i pruga Vrhpolje/Samac – Sarajevo te više lokalnih cesta. Vranduk 1 sastoji se od lijevoga i desnoga mosta gdje svaki smjer autoceste ima zasebnu konstrukciju gornjega i donjega ustroja. Monitoring je postavljen na desnome mostu Vranduk 1. Na desnome mostu, počevši od stacionaže 1 + 280,00 u duljini od 76,292 m do stacionaže 1 + 356,292, konstantna je lijeva krivina polumjera 755,75 m koja se nastavlja u prijelaznu krivinu (klotoida) dužine 92,5 m do stacionaže 1 + 448,792. Nakon toga ide kratki pravac dužine 11,257 m do stacionaže 1 + 460,049. Iza se nastavlja prijelazna krivina u dužini od 86 m do stacionaže 1 + 546,049 koja prelazi u konstantnu desnu krivinu polumjera 694 m na dužini od 123,951 m do kraja mosta do stacionaže 1 + 670,00. Vitoperenje se obavlja na potezu od 50 m, tj. po 25 m lijevo i desno od kratkoga pravca s poprečnoga nagiba 2,5 % prema lijevo u poprečni nagib 2,5 % prema desno. Niveleta je na početku skoro u tjemenu (0 %) i postupno dolazi do pada od 1,97 %.

Statički sustav mosta okvirna je konstrukcija (rasponska je konstrukcija prednapeta), ima tri stupa i četiri polja s rasponima $80\text{ m} + 120\text{ m} + 120\text{ m} + 70\text{ m} = 390\text{ m}$. Rasponska je konstrukcija sandučastoga poprečnog presjeka promjenjive visine od 6,80 m na stupu do 3,20 m u sredini raspona. Gornja je ploča debljine 0,30 m sa zadebljanjima uz rebro. Donja je ploča promjenjive debljine od 1,00 m nad stupom do 0,30 m u polju. Rebra su vertikalna i promjenjive debljine, 0,65 m nad osloncem, 0,50 m nakon prva tri segmenta. Širina je gornje ploče 12,92 m, a širina donje ploče 6,80 m. Bazni je segment dužine 8,00 m, prva dva segmenta dužine su 4,75 m, a ostali segmenti (zaključno s dvanaestim) dužine su 5,00 m. Spojni segmenti dužine su 3,00 m. Stupovi S1 i S3 dvodijelni su AB stupovi promjenjivoga poprečnog presjeka sa širinom zidova 6,80 m i nagibom vanjskih stranica stupa 1 : 100 od vrha stupa prema temelju. Zidovi stupa S1 debeli su 1,20 m, a stupa S3 1,40 m. Stup S1 visok je 20,23 m, a stup S3 20,67 m. Stup S2 sandučastoga je poprečnog presjeka s promjenjivim dimenzijama i stijenkom debljine 0,70 m. Stup je u vrhu dimenzija 6,80 x 4,50 m i širi se prema temelju u nagibu 1 : 100. Na dnu je dimenzija 7,79 x 5,49 m. Stup S2 visok je 49,35 m. Most je zanimljiv jer se izvodi tehnologijom slobodne konzolne gradnje, što podrazumijeva da se prvo napravi stup mosta, a zatim se na vrhu stupa napravi bazni segment. Nakon završenoga baznog segmenta podiže se oprema za slobodnu konzolnu gradnju (krletke) koja se montira i drži oplatu za daljnje segmente. Potom se uradi armatura pojedinoga segmenta i postave cijevi za prednapinjanje. Segment se betonira i nakon očvršćivanja betona na 70 % tlačne čvrstoće prednapinju se kablovi konzolne gradnje (kablovi u gornjoj ploči). Nakon prednapinjanja krletka se gura naprijed i proces se ponavlja istovremeno s obje strane konzole stupa dok se ne izradi i posljednji segment. Nakon izrade posljednjega segmenta na dvije susjedne konzole jedna se krletka pomiče i radi se spojni segment koji ujedinjuje konstrukciju. Poslije ovoga prednapinju se kablovi u poljima mosta koji osiguravaju nosivost konstrukcije na korisne terete. U mostu ima ukupno 120 kablova konzolne gradnje (40 kablova iznad svakoga stupa). U srednjim poljima ima po 16 kablova koji se prednapinju nakon spajanja polja, a u krajnjim poljima po 12 kablova. Dijelovi konstrukcije uz upornjake U1 i U2 rade se na skeli. U nastavku su prikazani uzdužni presjek mosta i karakteristični presjek rasponske konstrukcije.



Slika 1. Uzdužni presjek mosta

KARAKTERISTIČNI POPREČNI PRESJEK / CHARACTERISTIC CROSS SECTION
LIJEVI (DESNI) MOSTA VRANDUK 1 / LEFT (RIGHT) BRIDGE VRANDUK 1 M 1:25
NORMALNI POPREČNI PRESJEK MOSTA U POLJU / NORMAL CROSS SECTION OF THE BRIDGE IN
THE SPAN



Slika 2. Karakteristični poprečni presjek rasponske konstrukcije

2. Oprema i plan za monitoring

U izvedbi se koristila oprema njemačkoga proizvođača HBM. Mjerne trake za relativnu deformaciju rade na principu promjene otpora. Traka se jakim ljepilom veže za konstrukciju i deformira skupa s njom. Pri deformaciji mjerne trake mijenja se i otpor kroz traku, a ako se promjena otpora pomnoži s čimbenikom trake, dobije se promjena relativne deformacije. Sve mjerne trake za relativnu deformaciju jednoosne su i imaju početni otpor 120 Ω. Za beton su korištene mjerne trake s bazom dužine 50 mm zbog nehomogene prirode materijala. Za čelik su korištene mjerne trake s bazom dužine 3 mm kako bi cijela mjerna traka stala na širinu čelične žice. Korišten je uređaj *QuantumX 840A* koji ima osam ulaza te podržava konfiguracije punoga mosta i polumosta, ali ne i četvrtine mosta što je korišteno u ovome slučaju (pojedinačna mjerna traka). Zato su se izradili posebni adapteri tako što su se unutar 15-pinskog konektora postavili precizni metal-film otpornici od 120 Ω koji skupa s mjernom trakom čine konfiguraciju punoga mosta. Konektor je postavljen jako blizu trake (15 – 20 cm) kako bi se većim dijelom umanjile greške mjerenja uslijed dodatnoga otpora i promjene otpora kablova koji vode od konektora do mjerne trake.

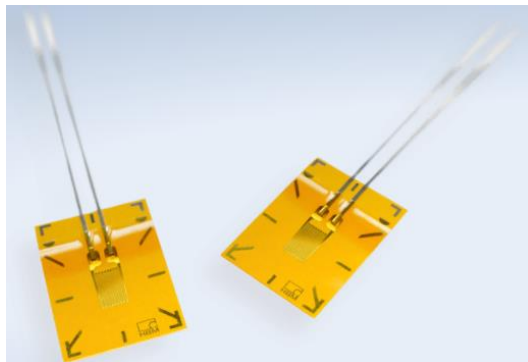
Sve su trake unaprijed pripremljene. Ovisno o mjernome mjestu napravljeni su nastavni kablovi koji na jednome kraju imaju muški, a na drugome ženski 15-pinski konektor.

Duljine su nastavnih kablova 15 – 22 m. Sve se trake preko nastavnih kablova spajaju u *QuantumX* univerzalno mjerno pojačalo koje ima točnost do 0,05 % i može mjeriti i do 40 000 uzoraka u sekundi. Pojačalo je povezano na računalo na kojem je instaliran program *CatmanEasy* koji služi za prikupljanje i obradu podataka. Uređaj i računalo povezani su na rezervno napajanje koje je povezano u mrežu napona 220 V.

Monitoring je započeo 3. lipnja 2021., planirano je trajanje do 3. listopada 2021. godine, a dio je više monitoringa koji će se iskoristiti za izradu doktorskoga rada. U tome razdoblju postupno su napravljeni svi segmenti konzolnom gradnjom nakon čega će se uraditi spojni segment, pri čemu je ostavljeno dovoljno vremena za monitoring spojene konstrukcije. Prate se promjene relativnih deformacija betona i čelika za prednapinjanje u presjeku uslijed fazne gradnje. Karakteristični koraci u slobodnoj konzolnoj gradnji su: pomak krletke, postavljanje oplata i armature, betoniranje segmenta i očvršćavanje betona, prednapinjanje kablova konzolne gradnje te ponovno pomak krletke. Cilj je izmjeriti promjene relativnih deformacija tijekom gradnje cijele konzole i nakon spajanja konstrukcije te iste usporediti s proračunskim modelima. Preko modula elastičnosti može se doći do naprezanja u betonu i čeliku. Osim relativnih deformacija na mostu se prate geodetske visine točaka na rubu svakoga segmenta tijekom cijele gradnje. I ove stvarne vrijednosti vertikalnih pomaka usporedit će se s već proračunatim nadvišenjima mosta i ponašanjem tijekom gradnje.



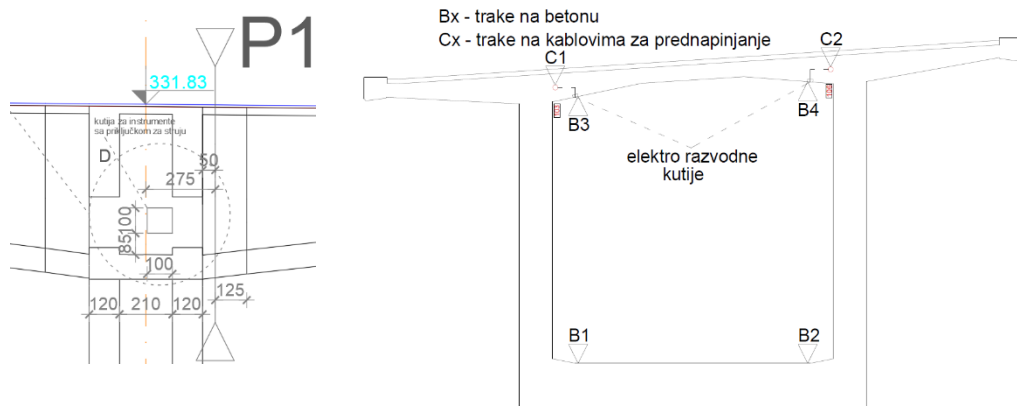
Slika 3. *QuantumX* – univerzalno mjerno pojačalo



Slika 4. Mjerne trake

3. Postavljanje mjernih traka

Mjerne trake za beton i čelik postavljene su u istome presjeku mosta radi lakše usporedbe rezultata. Presjek je pomaknut 50 cm od ruba dijafragme kako bi se izbjegao utjecaj dijafragme na relativnu deformaciju. Ukupno je postavljeno osam mjernih traka. Pet traka postavljeno je na beton, od čega su četiri postavljene na konstrukciju za mjerenje relativnih deformacija uslijed fazne gradnje, a jedna na tehnološku betonsku kocku dimenzija 15 x 15 x 15 cm za mjerenje relativnih deformacija uslijed promjene temperature. Tri trake postavljene su na čelik, od kojih su dvije postavljene na žice u kablovima za prednapinjanje koje mjere promjenu relativne deformacije čelika za prednapinjanje, a jedna na komad žice dužine otprilike 5 cm koja mjeri promjenu relativne deformacije uslijed promjene temperature.



Slika 5. Presjek u kojem su postavljene mjerne trake i položaj u presjeku

Mjerne trake lijepljene na beton imaju bazu dužine 5 cm. Lijepe se tako da se prvo izbrusi površina betona kako bi se dobila ravnija površina. Ovo je posebno potrebno na donjoj ploči zbog velike hrapavosti površine betona. Na gornjoj ploči beton je relativno ravan jer je stajao na oplati. Nakon brušenja postavlja se kuka koja služi za pridržanje trake i adaptera prije lijepljenja kao i osiguranje da se traka neće lako pokidati zbog vjetra ili slučajnoga povlačenja tijekom monitoringa. Traka i adapter vežu se za kuku plastičnim vezicama. Nakon toga se alkoholom čisti površina na koju će se zalijepiti traka. Dvokomponentno ljepilo miješa se i nanosi na površinu betona, nakon čega se mjerna traka postavi na ljepilo. Višak ljepila istisne se i čeka se kako bi se ljepilo očvrstnulo. Nakon što ljepilo očvrstne, na traku se stavlja zaštitna masa koja štiti od vremenskih prilika i blagih udaraca. Zaštitna masa pokriva traku cijelom dužinom, sve dok ne dođe do zaštićenoga kabela adaptera. Poslije ovoga silikonira se rub zaštitne mase kako bi se traka u potpunosti izolirala.



Slika 6. Postavljena mjerna traka za beton

Mjerne trake koje su se lijepile na čelik imaju bazu dužine 3 mm. Čelik je čist te nije bilo potrebe za brušenjem pa se alkoholom očistilo područje oko žice. Trake i adapteri pričvrstili su se plastičnim vezicama na okolnu armaturu. Na traku je nanoseno trenutačno ljepilo na bazi cijanoakrilata. Na traku je zatim postavljena zaštitna masa te je provjeren otpor.



Slika 7. Postavljena mjerna traka za čelik

Nakon postavljanja mjernih traka adapteri su nastavnim kablovima spojeni na uređaj koji se nalazi unutar baznoga segmenta. Nastavni kablovi traka za beton provučeni su kroz otvore u dijafragmi, a nastavni kablovi traka za čelik provučeni su kroz plastične cijevi ostavljene neposredno pored kabla za prednapinjanje.



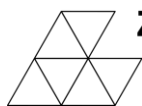
Slika 8. Kutija s mjernim pojačalom i računalom

4. Zaključak

Monitoring mosta Vranduk 1 Desno trebao bi dati rezultate koji će nakon usporedbe s više računskih modela pokazati koliko dobro modeli opisuju ponašanje konstrukcije. S obzirom na to da se monitoring paralelno radi na više slobodno konzolnih mostova različitih raspona i karakteristika, rezultati se mogu iskoristiti za kalibraciju postojećih modela ili za razvijanje novoga.

5. Literatura

- [1] Azman, M.K.: Deflection monitoring of cast in-situ balanced cantilever prestressed concrete box girder bridge, 2012
- [2] Jurišić, M., Džolan, A.: Program of measuring device placement on bridge Grabovina, Zajednički temelji 2019, Sedmi skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, 55-60, 2019, ISBN 978-953-6953-51-6
- [3] HBM: Test & Measurement | Load Cell | Transducer | Strain Gage, <https://www.hbm.com/en/>, pristupljeno: 31. 8. 2021.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.08>

PRIMJENA DIFERENCIJALNE GEOMETRIJE U PARAMETARSKOM MODELIRANJU LJUSKASTIH STRUKTURA U GRASSHOPPERU

THE APPLICATION OF DIFFERENTIAL GEOMETRY TO PARAMETRIC MODELLING OF SHELL STRUCTURES IN GRASSHOPPER

Nino Koncul¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb,
R. Hrvatska, nino.koncul@grad.unizg.hr

Sažetak

Ovaj rad je namijenjen postavljanju temelja za proučavanje krivulja i ploha pomoću diferencijalne geometrije u svrhu opisa krivulja i ploha parametarski, kako bi pomoću Grasshoppera proučavana svojstva ponudila inovativne pristupe u rješavanju mogućih statičkih i strukturalnih problema. Metode parametarskog modeliranja u Grasshopperu su također istražene u svrhu diferencijalnog pristupa pri rješavanju prostornih problema.

Ključne riječi: diferencijalna geometrija, parametarsko modeliranje, ljuskaste strukture

Abstract

This paper is intended to set the basis for researching curves and surfaces with the tools of differential geometry so as to attain a description of the curves and surfaces parametrically with the purpose of introducing new and innovative principles in the process of solving possible static and structural problems. Methods of parametric modelling in Grasshopper are investigated so as to use differential geometry as a tool to solve spatial and static constraints of various problems.

Keywords: differential geometry, parametric modelling, shell structures

1. Uvod

Zamislimo neka je ploha zadana parametarski:

$$X(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$

pri čemu parametri u i v predstavljaju koordinate na plohi. Ako zamislimo da je parametar u neka konstantna veličina, a v varijabla, tada će skup točaka u prostoru koji zadovoljava ta svojstva biti krivulja na toj plohi. Uočimo, parametri u i v čine „mrežu“ na plohi X .

Ako zamislimo jednu točku na plohi, tada toj točki možemo pridružiti tangencijalne vektore u smjeru parametara u i v (krivulja te plohe koje prolaze tom točkom):

$$g_1 = \frac{dX(u, v)}{du} = \left(\frac{dx}{du}, \frac{dy}{du}, \frac{dz}{du} \right) \quad (\text{tangencijalni vektor u toj točki u smjeru parametra } u)$$

$$g_2 = \frac{dX(u, v)}{dv} = \left(\frac{dx}{dv}, \frac{dy}{dv}, \frac{dz}{dv} \right) \quad (\text{tangencijalni vektor u toj točki u smjeru parametra } v)$$

pri čemu te vektore nazivamo kovarijantnim vektorima baze. Ti vektori neće biti nužno niti jedinični niti međusobno okomiti. Kovarijantni vektori su nam potrebni kako bismo definirali koeficijente prve fundamentalne forme (komponente metričkog tenzora):

$$E = g_1 \cdot g_1 = \frac{dX(u, v)}{du} \cdot \frac{dX(u, v)}{du}$$

$$F = g_1 \cdot g_2 = \frac{dX(u, v)}{du} \cdot \frac{dX(u, v)}{dv}$$

$$G = g_2 \cdot g_2 = \frac{dX(u, v)}{dv} \cdot \frac{dX(u, v)}{dv}$$

Prva fundamentalna forma je pogodna za računanje duljina krivulja duž smjerova u i v , dok je pomoću kovarijantnih vektora baze moguće opisati tangencijalni vektor v , vektor normale n i vektor binormale u zadanoj točki plohe.

Nadalje, pokazuje se korisnim definirati dodatne vektore g^i i g^2 (kontravarijantne vektore baze) u zadanoj točki plohe:

$$g^i \cdot g_j = \delta_j^i \quad \text{i} \quad g^i \cdot n = 0, \quad \text{pri čemu je } \delta_j^i = 1 \text{ ako } i = j, \text{ a } \delta_j^i = 0 \text{ ako } i \neq j.$$

Uočimo, zbog činjenice da je skalarni umnožak pripadajućih kontravarijantnih vektora s normalom na plohu jednak nuli, zaključujemo da kontravarijantni vektori leže u istoj ravnini kao i kovarijantni vektori baze, te da su okomiti na one vektore s kojima im je skalarni umnožak jednak nuli.

Razlog za definiranje dviju različitih baza za odabranu točku plohe leži u pogodnosti odabira za izračun daljnjih elemenata plohe, poput vlačne i tlačne čvrstoće te krutosti materijala od kojih je ploha konstruirana. U dvije dimenzije (naša ploha je opisana pomoću dvije varijable) za plohu od izotropnog materijala konstante elastičnosti je moguće izraziti pomoću Youngovog modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta [1]. Također, važan element plohe je njegova zakrivljenost koju definiramo kao funkciju (vektor) koja „mjeri“ promjenu smjera tangencijalnog vektora u zadanoj točki plohe:

$$\kappa = \frac{dv}{ds}.$$

Vektor zakrivljenosti se može rastaviti u dvije komponente:

$$\kappa = \kappa_g + \kappa_n$$

pri čemu je κ_g geodetska zakrivljenost plohe, a κ_n normalna zakrivljenost plohe.

Kako bismo jednostavnije zapisali kako izračunati κ_g i κ_n definirajmo:

$$g_{1,1} = \frac{d^2 X(u, v)}{du^2}$$
$$g_{1,2} = \frac{d^2 X(u, v)}{du dv} = \frac{d^2 X(u, v)}{dv du} = g_{2,1}$$
$$g_{2,2} = \frac{d^2 X(u, v)}{dv^2}$$

Sada, pomoću vektora normale n i drugih derivacija $g_{i,j}$ možemo definirati elemente druge fundamentalne forme:

$$L = n \cdot g_{1,1}$$

$$M = n \cdot g_{1,2}$$

$$N = n \cdot g_{2,2}$$

Pomoću elemenata prve i druge fundamentalne forme je moguće definirati i opisati srednju zakrivljenost:

$$H = \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)},$$

i Gaussovu zakrivljenost:

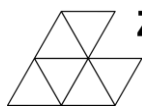
$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}.$$

2. Zaključno razmatranje

Trenutno istraživanje je provedeno na određenom broju pravčastih ploha i vitoperih pravčastih ploha. Primjenjene su grupe geometrijskih transformacija te je proučavan njihov utjecaj na prvu i drugu fundamentalnu formu tih ploha, a zatim kako te promjene utječu na druga svojstva te plohe. U Grasshopperu su te plohe modelirane poput ljuskastih struktura koristeći parametarsko modeliranje. Daljnji tijek istraživanja bi obuhvaćao druge plohe, te bi tema mogla biti proširena da obuhvati i istraživanje održivih inovativnih materijala i metode njihove iskoristivosti s obzirom na geometriju ljuskastih i modularnih struktura.

Literatura

- [1] [compiled by] S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, C. Williams: Shell structures for architecture: form finding and optimisation, Routledge, 2014.
- [2] A. E. Green, W. Zerna: Theoretical Elasticity, Carrendon Press, 1963.
- [3] W. Kuhnel: Differential geometry: Curves-Surfaces-Manifolds (Student mathematical library) 3rd edition, AMS, 2015.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.09>

KRITERIJI ZA PROJEKTIRANJE OTVORENIH PROSTORA ŠKOLA

CRITERIA FOR DESIGNING SCHOOL OUTDOOR SPACES

Marija Krajnović¹, Mia Roth-Čerina², Sanja Lončar-Vicković¹

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, mkrajnovic@gfos.hr; sloncar@gfos.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, mroth@arhitekt.hr

Sažetak

Uloga otvorenih prostora škola u obrazovnome procesu i u arhitekturi škola mijenjala se tijekom vremena, a u zadnjih nekoliko desetljeća ti prostori postaju sve važniji pedagogima, arhitektima i zajednici. Kvalitetni otvoreni prostori postojećih škola najčešće su rezultat individualnih napora projektanata i korisnika, bez sustavnoga okvira koji bi regulirao projektiranje otvorenih prostora škola na istoj razini kao i unutarnjih prostora. Cilj je ovoga rada dati kratki pregled istraživanja koje se provodi u sklopu doktorske disertacije o definiranju kriterija za projektiranje otvorenih prostora škola te njihova evaluacija u odnosu na pedagoške, arhitektonske i urbanističke kriterije. Postavljeni kriteriji provjeravat će se na primjerima škola grada Osijeka. Uspostavljanjem korelacije između pedagogije, arhitekture i urbanističkoga konteksta omogućuje se holistički pristup projektiranju otvorenih prostora škole. U radu su prikazani pregled teme, metodologija istraživanja te zaključci za daljnja istraživanja.

Ključne riječi: otvoreni prostori škola, školska zgrada, Osijek, kriteriji za projektiranje

Abstract

The role of school outdoor spaces in the educational process and in school architecture has changed over time and it is becoming an increasingly important topic for educators, architects and the local community. Examples of high quality outdoor spaces are usually results of individual efforts, lacking a systematic approach that would regulate the design of outdoor spaces at the same level as indoor school spaces. This paper provides insight into a doctoral dissertation research aiming to define the criteria for designing school outdoor spaces and their evaluation in relation to pedagogical, architectural and urban criteria. The criteria will be checked examining outdoor spaces of schools located in the city of Osijek. By establishing the relationship between pedagogy, architecture and urban context, a comprehensive approach to the outdoor spaces design will be defined. The paper will provide insight into relevant topics, research methodology and conclusions for further research.

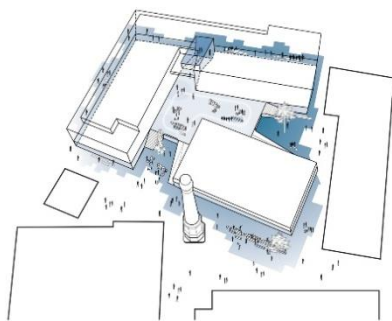
Keywords: School Outdoor Spaces, School Building, Osijek, Design Criteria

1. Uvod

U znanstvenoj i stručnoj literaturi provedena su brojna istraživanja o arhitekturi školskih zgrada, pretežno usredotočena na zatvorene prostore škola. Otvoreni prostori škola rijetko su zasebne teme istraživanja iz područja arhitekture i urbanizma, što dovodi do nedostatka suvremenih domaćih stručnih i znanstvenih radova o oblikovanju i sadržajima otvorenih prostora škola. Bez sustavnoga pristupa planiranju i projektiranju otvoreni prostori škola formiraju se stihijski, ne koriste se optimalno, njihovo oblikovanje ne prati suvremeni pedagoški program te ne koristi potencijal okolnoga konteksta. Na temelju kataloške obrade odabranih primjera otvorenih prostora školskih zgrada, identificirat će se značajke pojedinih otvorenih prostora te definirati kriteriji za projektiranje, uspostavljeni u odnosu na pedagoški program, planiranje i programiranje škola i kontekst. Definirani kriteriji provjerit će se na određenome broju otvorenih prostora škola u Osijeku čime će se vrjednovati njihova važnost i potencijal te dati prijedlozi za njihovo unaprjeđenje.

2. Znanstveni problem i potreba za istraživanjem

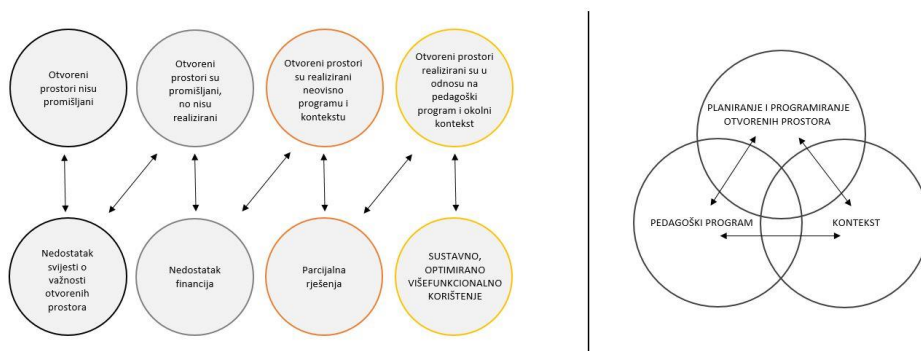
Otvoreni prostori škole dijelovi su školske parcele koji nisu pokriveni školskom zgradom [1], a često se prilikom njihova dimenzioniranja predviđa površina za buduće namjene koje će zahtijevati demografske promjene u školskome području ili za nove funkcije koje će biti rezultat razvoja pedagoške znanosti i društvenoga napretka [2]. U pedagoškoj literaturi školsko dvorište ima važnu pedagošku funkciju te predstavlja most između prirodne sredine i školske zgrade [3], a mnoga istraživanja [4] pokazuju kako su vanjski prostori posebno važni u psihomotoričkome razvoju djece s različitim zdravstvenim poteškoćama (autizmom, problemima dišnoga sustava, zastojsima u razvoju itd.). Kvaliteta vanjskih prostora za igru u svezi je s ekonomskim uvjetima škole [5], a povećanjem tradicionalnih prostora za rekreaciju te postavljanjem otvorenih natkrivenih zona na granicama unutarnjega i vanjskoga prostora može se potaknuti tjelesna aktivnost djece [6]. Igra je izuzetno važna u razvoju socijalnih vještina, fine i grube motorike kao i iskorištavanju viška energije [7]. Odnos unutarnjega i vanjskoga prostora obrazovnih ustanova treba biti fleksibilan u ovisnosti o karakteristikama regije, lokaciji, klimatskim uvjetima, odgojnoj praksi, gustoći i strukturi grada te drugim specifičnim uvjetima [8]. Aktivno učenje u vanjskome okruženju bolje stimulira sve aspekte dječjega razvoja nego što se to događa u zatvorenome okruženju [9], ali nekvalitetni i neodržavani vanjski prostori mogu imati utjecaj i na učenikov loš uspjeh [10]. Participacija korisnika i lokalne zajednice prilikom planiranja školskih zgrada može utjecati na kasnije zadovoljstvo školskom zgradom [11], posebice otvorenih prostora koje u izvannastavno vrijeme može koristiti lokalna zajednica. Mnogi svjetski i europski primjeri potvrđuju činjenicu kako otvoreni prostori škole mogu koristiti svim stanovnicima grada te time nadograđuju kvalitetu susjedstva [Slika 1 a]. U Hrvatskoj je takav primjer Osnovna škola Žnjan Pazdigrad u Splitu koja omogućuje korištenje otvorenih prostora svim stanarima naselja i formira novo središte susjedstva [Slika 1 b].



Slika 1. (a) Europska škola u Kopenhagenu [izvor: www.archdaily.com], (b) školski trg OŠ Žnjan Pazdigrad u Splitu, [izvor: vizkultura.hr, autori fotografija: Bosnić + Dorotić]

Površinu školskoga zemljišta za izgradnju školske zgrade u Hrvatskoj definira Državni pedagoški standard osnovnoškolskog sustava odgoja i obrazovanja [12], a kada je riječ o sadržaju otvorenih prostora, normirana su samo vanjska igrališta [13]. U ovome će se istraživanju provesti sustavna analiza otvorenih prostora, postaviti će se kriteriji za njihovo projektiranje te će ih se vrjednovati na primjeru Osijeka. Većina školskih zgrada u Osijeku izgrađena je ili dograđena nakon *Urbanističkoga plana* Radovana Miščevića [14] kada je započeo snažan razvoj ovoga grada. Otvoreni prostori škola iz toga razdoblja često su bili predimenzionirani, a igrališta neupotrebljavana jer se prilikom projektiranja nije pazilo na potrebe škole i ostalih korisnika [15]. Školske zgrade u Osijeku dosad nisu istraživane s arhitektonskoga stajališta, a u radu će se metodom usporedne analize identificirati značajke otvorenih prostora škola te definirati kriteriji za njihovo optimalno projektiranje kao i unaprjeđenje postojećih. Proučavanjem literature i primjera otvorenih prostora škola uočeno je više istraživačkih problema [Slika 2]:

- nepotpuno iskorištavanje potencijala otvorenih prostora škola te neuvažavanje promjena u pedagogiji koje se odražavaju na otvorene prostore škola
- nesustavno projektiranje otvorenih prostora škola te ovisnost o pojedinačnim rješenjima projektanata i korisnika
- nedovoljno iskorišten potencijal otvorenih prostora škola u odnosu na uži i širi kontekst.



Slika 2. Istraživački problemi povezani uzročno-posljedičnim vezama [izvor: vlastite skice autora]

3. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Na temelju ranije definiranih istraživačkih problema postavljeni su sljedeći ciljevi istraživanja:

- Definirati kriterije za projektiranje otvorenih prostora škola u skladu sa suvremenim pedagoškim programom.
- Definirati kriterije za normiranje otvorenih prostora škola kao i unaprjeđenje postojećih.
- Istražiti potencijal i korelaciju otvorenih prostora i konteksta te definirati kriterije za projektiranje uvažavajući uži i širi kontekst.

Osnovne hipoteze istraživanja usklađene su s postavljenim ciljevima te glase:

- Suvremene pedagoške potrebe trebaju nove prostorne definicije koje se odnose i na otvorene prostore škola.
- Otvoreni prostori škola mogu se normirati te unaprijediti primjenjujući postavljene kriterije.
- Optimalno korištenje otvorenih prostora škola ovisi o njihovom odnosu s kontekstom, a njihovo višefunkcionalno korištenje može utjecati na uži i širi kontekst te život zajednice.

4. Metodologija i tijek istraživanja

U istraživanju se koriste sva dostupna znanstvena i stručna literatura, doktorska i magistarska istraživanja, arhive autora projekata, dostupno arhivsko gradivo, arhitektonska i urbanistička dokumentacija i internetski izvori, a u analizi će se koristiti vlastite skice i dijagrami. Iz dokumentacije i kataloga primjera uspoređivat će se podaci (analitička i komparativna metoda, matematičko-statističke metode obrade podataka), vršit će se grafičke analize, a po potrebi će se fotodokumentirati i evidentirati trenutačno stanje i korištenje otvorenih prostora. Anketirat će se korisnici, projektanti i lokalna zajednica te će se vršiti strukturirani intervjui.

Istraživanje je podijeljeno u tri faze: analiza, sinteza te provjera kriterija. Za potrebe istraživanja izrađuje se katalog u svezi s analitičkom fazom istraživanja, a sadrži analize primjera otvorenih prostora postojećih škola oblikovanih u odnosu na različite pedagoške koncepte, analize i usporedbe normativa za projektiranje te sadržaja otvorenih prostora na parceli kao i analize odnosa otvorenih prostora i okolnoga konteksta. Drugi katalog sastoji se od primjera škola grada Osijeka na kojima će se vrjednovati postavljeni kriteriji te dati kriteriji za unaprjeđenje postojećih otvorenih prostora škola.

U prvome dijelu istraživanja analizirat će se pedagoški koncepti otvorenih prostora u razvoju arhitekture školskih zgrada, njihov utjecaj na razvoj djeteta, tendencije u pedagogiji i njihov utjecaj na otvorene prostore škola te način korištenja otvorenih prostora u nastavnome i izvannastavnome procesu. Istražit će se najvažniji primjeri koji na specifičan način artikuliraju otvorene prostore škole te uloga i karakteristike otvorenih prostora u arhitekturi škola.

Sastavni je dio ovoga dijela analiza zakonskih i urbanističkih okvira planiranja i programiranja zgrada osnovnih škola, pedagoških standarda i normativa za projektiranje osnovnih škola u Hrvatskoj i inozemstvu.

U posljednjem dijelu analize istražiti će se otvoreni prostori u odnosu na obilježja lokacije i okolnoga konteksta, analizirat će se višefunkcionalno korištenje otvorenih prostora s

planerskoga, sigurnosnoga i socijalnoga aspekta. Također će se analizirati brojni domaći i inozemni suvremeni primjeri školskih zgrada, istražiti će se koliko društvena zajednica koristi otvorene prostore te će se predložiti kriteriji za projektiranje otvorenih prostora u odnosu na okolni kontekst.

Drugu fazu istraživanja čini sinteza u kojoj će se definirati sveobuhvatni kriteriji za projektiranje otvorenih prostora na temelju podataka iz analitičkoga dijela istraživanja. Kriteriji će se postaviti u odnosu na pedagoški program, normative koji reguliraju projektiranje te okolni kontekst.

U trećoj fazi predloženi kriteriji provjerit će se na osnovnoškolskim zgradama u Osijeku te će se provesti kvalitativno i kvantitativno vrjednovanje, kritička analiza i usporedba postojećih otvorenih prostora škola. Opisat će se razvoj i pregled osnovnoškolskih zgrada u Osijeku, analizirat će se značajke postojećih otvorenih prostora, lokacijska obilježja, odnos s kontekstom te koliko korisnici lokalne zajednice koriste otvorene prostore. Ciljevi su ovoga dijela istraživanja provjeriti postavljene kriterije te vrjednovati postojeće primjere radi unaprjeđenja prema postavljenim kriterijima. Glavni je cilj rada dokazati kako su otvorenim prostorima većine školskih zgrada nužna unaprjeđenja kako bi se uskladila sa suvremenim pedagoškim dostignućima te da su unaprjeđenja moguća u skladu s postavljenim kriterijima.

5. Očekivani rezultati istraživanja

Ciljevi su istraživanja sistematizacija tipova otvorenih prostora škola ovisno o urbanome kontekstu, definiranje kriterija za unaprjeđenje postojećih i projektiranje novih otvorenih prostora školskih zgrada te razvijanje domaće znanstvene literature o školskim zgradama. Dobiveni rezultati moći će poslužiti u izradi nacionalnih dokumenata, ugraditi se u pravilnike koji reguliraju projektiranje osnovnoškolskih zgrada, ali i pomoći projektantima pri projektiranju i organizaciji školske parcele kao i korisnicima obrazovnih institucija kako bi na najkvalitetniji način iskoristili potencijal školskoga zemljišta.

6. Zaključak

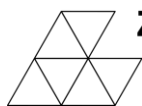
Planirano uključivanje otvorenih prostora u obrazovni proces iznimno je važno kako bi se postiglo njihovo pojačano sustavno, optimirano i višefunkcionalno korištenje. Ovim se istraživanjem želi ukazati na potrebu sveobuhvatnoga sagledavanja problema i teme otvorenih prostora škola kroz promjene u pedagogiji, urbanome kontekstu i sustavu kojim se regulira projektiranje zgrada za odgoj i obrazovanje. Izrađeni katalozi, analize i kriteriji poslužit će kao baza za nova istraživanja, a uspostavljanjem relacije između pedagogije, arhitekture i urbanističkoga konteksta teži se sveobuhvatnomu pristupu projektiranju otvorenih prostora.

Literatura

- [1] Auf-Franić, H.: Osnovne škole: programiranje, planiranje i projektiranje, Golden marketing - Tehnička knjiga: Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 61, 2004.
- [2] Bajbutović, Z.: Arhitektura školske zgrade, Svjetlost, Sarajevo, 1981.
- [3] Bognar, L.; Matijević, M.: Didaktika, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [4] Hebert, B.: Design Guidelines of a Therapeutic Garden for Autistic Children, MLA thesis dissertation, Department of Landscape Architecture, Louisiana State University, 2002.
- [5] Herrington, S.; Lesmeister, C.; Nicholls, J.; Stefiuk, K.: Seven C's: An informational guide to young children's outdoor play spaces, Consortium for Health, Intervention, Learning and Development (CHILD), 2006.,
izvor: <https://sala.ubc.ca/sites/sala.ubc.ca/files/documents/7Cs.pdf>
- [6] Gorman N.: Designer Schools: The Role of School Space and Architecture in Obesity Prevention, Obesity, 15 (11), 2007., 2521-2530
- [7] Mozaffar, F.; Mirmoradi, S.S.: Effective Use of Nature in Educational Spaces Design, Organization, technology & management in construction, 4 (1), 2012, 381-392, izvor: <https://doi.org/10.5592/otmcj.2012.1.3>
- [8] Roth Čerina, M.: Određivanje arhitektonskih parametara u projektiranju zgrada za predškolski odgoj, doktorski rad, Zagreb, 2015.
- [9] Moore, R.C.; Wong, H. H.: Natural Learning: The Life History of an Environmental Schoolyard, Berkeley, CA: MIG, 1997.
- [10] Tanner, C.K.: The influence of school architecture on academic achievement, Journal of Educational Administration, 38 (4), 2000., 309-330, izvor: <https://doi.org/10.1108/09578230010373598>
- [11] Sanoff, H.: Participation in school planning, Independently published, ISBN-10: 1796658987, ISBN-13: 978-1796658989, 2019.
- [12] Državni pedagoški standard osnovnoškolskog sustava odgoja i obrazovanja (63/2008, 90/2010),
izvor: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_06_63_2129.html
- [13] Ministarstvo znanosti i obrazovanja, Odluka o utvrđivanju normativa prostora i opreme građevina škola, građevina školskih sportskih dvorana i školskih vanjskih igrališta, 2013., izvor: <https://mzo.gov.hr/vijesti/odluka-o-utvrđivanju-normativa-prostora-i-opremegradjevina-skola-gradjevina-skolskih-sportskih-dvorana-i-skolskih-vanjskih-igralista/1476>
- [14] Mišćević, R.: Osijek - Urbanistički plan, Zagreb, 1965.
- [15] Stella, I.: Dvorane za fizičku kulturu, školska vježbališta i bazeni, oprema, Školska knjiga, Zagreb, 1971.

Izvori fotografija:

- Slika 1.(a) https://www.archdaily.com/909157/the-european-school-copenhagen-nord-architects-plus-vilhelm-lauritzen-architects?ad_medium=gallery
- Slika 1. (b) <https://vizkultura.hr/osnovna-skola-znjan-pazdigrad/>



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.10>

DJELOVANJE EKSPLOZIJE NA STUPOVE NADVOŽNJAKA

EFFECT OF BLAST LOAD ON HIGHWAY BRIDGE COLUMNS

Sanja Lukić¹, Hrvoje Draganić¹

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za materijale i konstrukcije, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, slukic@gfos.hr; draganic@gfos.hr

Sažetak

Posljednjih desetljeća svjedočimo sve učestalijim terorističkim napadima eksplozivnim napravama, a mostovi su zanimljivi zbog lake dostupnosti i velike važnosti u infrastrukturi. Promatrano je djelovanje eksplozije na stup jer gubitak nosivosti stupa mosta utječe na nosivost cijele konstrukcije. Stupovi su kritični elementi jer su u prošlosti dimenzionirani na minimalna horizontalna djelovanja. Stoga su pregledani arhivirani projekti nadvožnjaka na hrvatskim cestama i autocestama te je izabran stup dimenzioniran prema Jugoslavenskim standardima koji će se eksperimentalno ispitati na djelovanje eksplozije. Ciljevi su provjeriti otpornost postojećega stupa na djelovanje eksplozije te povećati bazu eksperimentalnih podataka. Na temelju izmjerenih rezultata kalibrirat će se numerički model koji se može koristiti za daljnje simulacije različitih scenarija djelovanja eksplozije.

Ključne riječi: stupovi nadvožnjaka, eksperimentalno ispitivanje, djelovanje eksplozije

Abstract

In recent decades, we have witnessed an increasing number of terrorist attacks utilizing improvised explosive devices. Bridges are attractive targets because of their easy accessibility and great importance in transportation infrastructure. The failure of the bridge column affects the bearing capacity of the entire structure, therefore the effect of the blast load on the column was observed. Columns are critical because in the past they have been designed to withstand minimal lateral loads. The archived overpass projects on Croatian roads and highways were reviewed, and a column designed according to Yugoslav standards was selected. The selected column will be field blast tested. The aim is to test the resistance of the existing column on the blast load and increase the database of measured blast wave parameters. A numerical model will be calibrated and used for further blast load simulations based on the measured results.

Keywords: highway bridge columns, field blast tests, blast load

1. Uvod

U posljednjih pet desetljeća broj terorističkih napada u svijetu raste. Postoje različite vrste napada, ali prema podacima Nacionalnoga konzorcija za proučavanje terorizma i odgovora na terorizam u posljednja dva desetljeća napadi eksplozivnim napravama premašuju 50 % od ukupnoga broja incidenata [1]. Sve do danas mete napada bile su građevine od velike društvene i ekonomske važnosti jer njihovo uništavanje uzrokuje najveći strah među ljudima. Napadi na „Blizance“ (*The Twin Towers*) Svjetskoga trgovačkog centra 11. rujna 2001. godine i mostove u Kaliforniji i New Yorku utjecali su na projektiranje konstrukcija u Sjedinjenim Američkim Državama, ali i u ostatku svijeta [2]. Prometna infrastruktura neophodna je za obavljanje svakodnevnih aktivnosti te je transportni sustav jedan od zanimljivijih meta [3]. Zbog velikoga broja mostova širom svijeta, puno potencijalnih žrtava, visokih troškova sanacije i važnosti u svakodnevnome životu, mostovi postaju središte terorističkih napada. Oštećivanje i uništavanje određenih prometnih dionica ili konstrukcija, kao što su mostovi, može prouzročiti poteškoće u prometu i odsijecanje strateških točaka. Navedeno potvrđuje činjenica kako je u posljednjih nekoliko napada u Nigeriji u 2020. godini uništeno sedam mostova. Bilo bi nepraktično kada bi se svi mostovi duž visokovrijedne prometne dionice pratili i čuvali, stoga inženjeri moraju osmisliti određene proračunske metode kako bi osigurali određenu razinu otpornosti na djelovanja eksplozija. Kako postoje različite vrste mostova i različiti načini napada na mostove, teško je predvidjeti ponašanje mosta na djelovanje eksplozije [4]. Cooper i dr. [3] navode kako su stupovi jedna od najkritičnijih komponenti na svim vrstama mostova. U prošlosti stupovi nisu bili dimenzionirani kako bi mogli podnijeti velika horizontalna dinamička opterećenja te su i iz toga razloga zanimljiva meta [5]. Cilj je preliminarnim numeričkim analizama utvrditi najkritičniji stup nadvožnjaka na djelovanje eksplozije na hrvatskim cestama i autocestama te ga eksperimentalno ispitati. Nakon provedenoga eksperimentalnog ispitivanja provest će se kalibracija numeričkih modela prema eksperimentalnim rezultatima te će se model koristiti za daljnja istraživanja.

2. Pregled eksperimentalnih ispitivanja

Zbog omjera cijene i kvalitete armiranobetonske konstrukcije široko su zastupljene u svijetu te stoga ne čudi što je najveći broj mostova izgrađen od armiranoga betona. Unatoč njihovoj rasprostranjenosti u literaturi je pronađen mali broj armiranobetonskih stupova ispitanih na djelovanje eksplozije. Davis i dr. [6] ispitali su ih u malome mjerilu i u mjerilu 1 : 2. Na temelju provedenih eksperimenata donijeli su pet zaključaka i smjernica za projektiranje stupova, navedenih i u [4, 7]. Preporuke se odnose na izgled stupa, oblikovanje i preklapanje armature te postavljanje zaštitnih ograda i prepreka kako bi se povećala udaljenost automobila od stupa. Isto tako navode i tri kategorije projektiranja (A, B i C) s obzirom na skaliranu udaljenost Z koja ovisi o količini eksploziva i stvarnoj udaljenosti od stupa. Yuan i dr. [8] promatrali su kvadratni i kružni armiranobetonski stup u mjerilu 1 : 3 na djelovanje kontaktno postavljenoga eksploziva (1 kg TNT-a). Oba su stupa doživjela otpadanje i drobljenje zaštitnoga sloja betona, ali je kod kvadratnoga stupa došlo i do sloma poprečne armature, stoga se oštećenje može okarakterizirati kao značajnije. Zbog sličnosti u djelovanjima potresa i eksplozije Bruneau i dr. [9] te Fujikura i dr. [10] razvili su i ispitali stupašte na višestruku opasnost (engl. *multi-hazard*). Uzorci stupova napravljeni su kao čelični cijevni profili ispunjeni betonom (engl. *concrete-filled steel tube* – CFST), različitih promjera u mjerilu 1 : 4. U ispitivanju je eksploziv postavljen tako da simulira scenarij napada kada je eksploziv

postavljen u automobil ispod mosta u blizinu stupa. Stupovi su pokazali duktilno ponašanje i visoku otpornost na djelovanje eksplozije te prednost pred armiranobetonskim stupovima jer ne dolazi do drobljenja i ljuštenja betona odnosno do letećih krhotina. Također eksperimentom su pokazali da čak i minimalno povećanje udaljenosti eksploziva od stupa kao i povećanje promjera stupa bitno smanjuje deformaciju stupa. Isto su ponovili Fujikura i Bruneau [11], ali s običnim armiranobetonskim stupovima i stupovima ovijenim čelikom. Svi su stupovi otkazali na posmik pri dnu, armiranobetonski stupovi doživjeli su i otpadanje betona, dok stupovi ovijeni čelikom nisu imali oštećenje toga tipa. Čelični cijevni profili ispunjeni betonom (CFST) pokazali su duktilnije ponašanje u odnosu na ispitane stupove u ovome radu. Fouché i dr. [12] na stupove omotane čelikom dodali su još čelično ojačanje u obliku ogrlice (engl. *steel collar*) na dnu i vrhu stupa. Zaključili su kako dodano ojačanje djeluje učinkovito na sprječavanje izravnoga smicanja i na povećanje duktilnosti stupa. Fouché i dr. [13] eksperimentalno su ispitali dvanaest stupova s dvostrukim čeličnim cijevima ispunjenim betonom (engl. *Concrete-Filled Double-Skin Tubes – CFDST*) u mjerilu 1 : 4. Varirali su omjer šupljine u odnosu na cijeli poprečni presjek, promjer i debljinu unutarnje i vanjske cijevi. Unutarnja cijev spriječila je izravan slom smicanjem, što je prednost ove vrste stupa u odnosu na armiranobetonski i CFST stup. Na temelju pregleda eksperimentalnih ispitivanja provedenih na stupovima mostova prikazanih u Tablici 1 zaključuje se kako su armiranobetonski stupovi mostova nedovoljno istraženi. Smatra se kako je uzrok tomu složenost izvedbe eksperimenta i visokih troškova za stupove mostova u stvarnome mjerilu. Ove vrste eksperimenta zahtijevaju posebno područje, obično vojni poligon i obučeno osoblje za rukovanje eksplozivima. Međutim, i ispitivanja na vojnim poligonima imaju ograničenja u pogledu maksimalne količine eksploziva koja se može upotrijebiti u jednoj detonaciji te je i time ograničena veličina uzoraka za ispitivanje. Dosadašnji eksperimenti provedeni su većinom u mjerilu 1 : 4, potom 1 : 3, a u mjerilima 1 : 2 i 1 : 1 izvode se pretežno stupovi zgrada. Istraživanja provedena posljednjih desetljeća pokazala su kako ispitivanja na umanjenim uzorcima pružaju dovoljno pouzdane rezultate i potrebno znanje za analiziranje učinaka eksplozije na konstrukcije u stvarnome mjerilu [12].

Tablica 1. Popis eksperimentalnih istraživanja na stupovima mostova

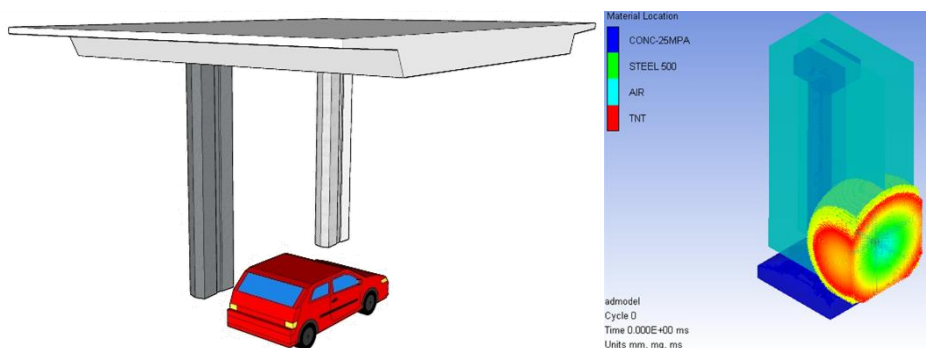
Autori	Godina	Materijal	Mjerilo
Bruneau i dr.[9]	2006.	CFCSC	1 : 4
Fujikura i dr.[10]	2008.	CFST	1 : 4
Davis i dr. [6]	2009.	RC	1 : 2
Fujikura i Bruneau [11]	2010.	RC i RC SJ	1 : 4
Williamson i dr. [4]	2011.	RC	1 : 2
Fouché i dr. [12]	2016.	RC MSJ	1 : 4
Yuan i dr. [8]	2017.	RC	1 : 3
Fouché i dr. [13]	2017.	CFDST	1 : 4

Bilješka (engl.): CFCSC – *Concrete-Filled Circular Steel Columns*, CFST – *Concrete-Filled Steel Tube*, RC – *Reinforced Concrete*, SJ – *Steel Jacket*, MSJ – *Modified Steel Jacket*, CFDST – *Concrete-Filled Double-Skin Tubes*.

3. Preliminarna ispitivanja

3.1. Odabir stupa i scenarija napada

Pregledom državnih arhiva dobivene su opće i detaljne informacije o vrsti, geometriji, korištenim materijalima, izgradnji i projektnim detaljima za postojeće nadvožnjake. Izdvojeni su svi oblici stupova, a za najučestalije napravljena je preliminarna numerička analiza. Visina naboja određena je s obzirom na visinu i geometriju vozila. Zbog postojećih cestovnih barijera oko stupa udaljenost automobila od stupa nadvožnjaka jest 2,0 m. Promatrani scenarij napada prikazan je na Slici 1 (lijevo). U numeričkoj analizi u programu *Ansys Autodyn* [14] modelirani su stupovi u stvarnome mjerilu te su izloženi djelovanju eksplozivnoga naboja koje, prema literaturi, stane u jedan prosječan automobil. Numerički model prikazan je na Slici 1 (desno), a sastoji se od armiranobetonskoga stupa, naboja te zraka oko stupa kroz koji se širi tlak od eksplozije. Daljnja analiza rađena je na stupu s najvećim tlakovima od djelovanja eksplozije, a odabrani stup ujedno ima i najmanje dimenzije poprečnoga presjeka te se smatra najugroženijim na osječkoj obilaznici. Nadvožnjak je građen 1970. godine te je dimenzioniran prema Jugoslavenskim standardima.



Slika 1. Analizirani scenarij napada (lijevo) [15] i numerički model stupa u *Ansys Autodyn* programu (desno)

3.2. Opis eksperimenta

Za eksperimentalna ispitivanja određeni su količina i udaljenost eksploziva od stupa te razina oštećenja koristeći program SBEDS (engl. *Single-Degree-of-Freedom Blast Effects Design Spreadsheets*) koji je utemeljen analizom zamjenjujućega sustava s jednim stupnjem slobode (SDOF). Prototip stupa bit će u mjerilu 1 : 3, visine 2,0 m jer je prosječna stvarna visina stupa 6,0 m zbog nesmetana prolaza automobila ispod nadvožnjaka. Zbog sigurnosnih razloga informacija o količini eksploziva čuva se kao tajna. Eksperimenti će se provoditi na vojnome poligonu u suradnji s Hrvatskom vojskom. Tijekom eksperimentalnoga ispitivanja mjerit će se tlakovi u slobodnome polju, reflektirani tlakovi, ubrzanja i pomaci stupa. Rezultati će činiti bazu podataka mjerenih parametara uslijed djelovanja eksplozija te će se koristiti za kalibraciju numeričkoga modela u *Ansys Autodyn* programu.

4. Zaključak

Eksperimentalnim ispitivanjem stupova na djelovanje eksploziva postavljenoga u automobil ispod mosta utvrdit će se otpornost najugroženijega stupa nadvožnjaka na osječkoj obilaznici. Izmjereni parametri tijekom eksperimentalnih ispitivanja koristit će se za proširenje baze podataka o parametrima eksplozije te o ponašanju armiranobetonskih stupova na djelovanje eksplozije. Svi izmjereni podatci i oštećenje stupa koristit će se za kalibraciju numeričkih modela. Numerička simulacija znatno je jeftinija, brža i sigurnija nego provedba eksperimentalnoga ispitivanja. Stoga je cilj razviti pouzdan i točan numerički model koji će biti dalje korišten u istraživanjima stupova, tj. bit će moguće numerički istražiti stup mosta koji nije eksperimentalno ispitan.

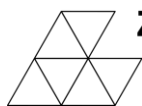
Zahvala

Znanstveni rad proveden je u okviru istraživačkoga projekta Hrvatske zaklade za znanost *Otpornost stupova nadvožnjaka na djelovanje eksplozije*, pod oznakom UIP-2017-05-7041, te im zahvaljujemo na potpori.

Literatura

- [1] START. 2017. p. National consortium for the study of terrorism and responses to terrorism. Global terrorism database [Data file 2017.], pristupljeno: 15. svibnja 2020.
- [2] Winget DG, Marchand KA, Williamson EB. Analysis and design of critical bridges subjected to blast loads. *Journal of Structural Engineering*. 2005;131:1243-55. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:8\(1243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:8(1243))
- [3] Cooper JD, Smith MC, Ernst SL. BLUE RIBBON PANEL RECOMMENDATIONS FOR BRIDGE AND TUNNEL SECURITY.
- [4] Williamson EB, Bayrak O, Davis C, Williams GD. Performance of bridge columns subjected to blast loads. I: Experimental program. *Journal of Bridge Engineering*. 2011;16:693-702. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000220](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000220)
- [5] Abedini M, Mutalib AA, Raman SN, Alipour R, Akhlaghi E. Pressure–impulse (P–I) diagrams for reinforced concrete (RC) structures: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019;26:733-67. <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9260-9>
- [6] Davis CE, Williams GD, Williamson EB, Marchand KA, McKay AE, Bayrak O. Design and detailing guidelines for bridge columns subjected to blast and other extreme loads. *Structures Congress 2009: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*2009. p. 1-10.
- [7] Williamson EB, Bayrak O, Davis C, Daniel Williams G. Performance of bridge columns subjected to blast loads. II: Results and recommendations. *Journal of Bridge Engineering*. 2011;16:703-10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000221](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000221)
- [8] Yuan S, Hao H, Zong Z, Li J. A study of RC bridge columns under contact explosion. *International Journal of Impact Engineering*. 2017;109:378-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.07.017>
- [9] Bruneau M, Lopez-Garcia D, Fujikura S. Multihazard-resistant highway bridge bent. *Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety*2006. p. 1-4.

- [10] Fujikura S, Bruneau M, Lopez-Garcia D. Experimental investigation of multihazard resistant bridge piers having concrete-filled steel tube under blast loading. *Journal of Bridge Engineering*. 2008;13:586-94. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2008\)13:6\(586\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2008)13:6(586))
- [11] Fujikura S, Bruneau M. Experimental investigation of seismically resistant bridge piers under blast loading. *Journal of Bridge Engineering*. 2010;16:63-71. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000124](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000124)
- [12] Fouché P, Bruneau M, Chiarito VP. Modified steel-jacketed columns for combined blast and seismic retrofit of existing bridge columns. *Journal of Bridge Engineering*. 2016;21:04016035. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000882](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000882)
- [13] Fouché P, Bruneau M, Chiarito V. Dual-hazard blast and seismic behavior of concrete-filled double-skin steel tubes bridge pier. *Journal of Structural Engineering*. 2017;143:04017155. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001883](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001883)
- [14] Ansys. *Ansys Autodyn Users`s Manual*. Canonsburg, PA, USA2010.
- [15] Lukić S, Draganić H. Blast load analysis of overpass columns with various cross-sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;867:012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/867/1/012028>



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.11>

ANALIZA POLUMJERA PUTANJE VOZILA U HORIZONTALNIM KRIVINAMA IZVANGRADESKIH DVOTRAČNIH CESTA

ANALYSIS OF VEHICLE PATH RADII ON HORIZONTAL CURVES FOR TWO-LANE RURAL ROADS

Biljana Maljković¹, Dražen Cvitanić¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, biljana.maljkovic@gradst.hr; drazen.cvitanic@gradst.hr

Sažetak

U ovome radu analizirani su polumjeri putanje vozila u horizontalnim krivinama izvangradskih dvotračnih cesta radi uočavanja lokacija sa smanjenom razinom konzistencije. U analizi su korišteni podatci prikupljeni eksperimentalnim istraživanjem provedenim na dionici dvotračne državne ceste DC1 u Republici Hrvatskoj, u kojem su uz primjenu visokofrekventnoga GPS uređaja snimane vožnje reprezentativnoga uzorka vozača. Primjenom višestruke regresijske analize istražen je moguć utjecaj geometrijskih obilježja trase na vozačev izbor putanje vozila, a provedena analiza nije rezultirala statistički važnim modelom. Ustanovljeno je kako vozači uglavnom izvode polumjer putanje vozila manji od projektiranoga (u prosjeku 12 % manji). Najveća odstupanja izvedenih polumjera od projektiranih vrijednosti uočena su u krivinama manjih polumjera ($R < 150$ m) što ukazuje na povećani rizik od proklizavanja, a može se dovesti u svezu i s povećanom stopom prometnih nesreća u oštrim krivinama.

Ključne riječi: polumjer putanje vozila, horizontalna krivina, konzistencija toka trase

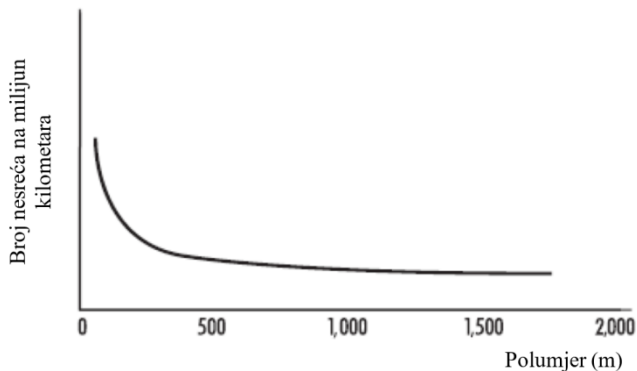
Abstract

In order to obtain locations with reduced level of consistency, vehicle path radii on horizontal curves for two-lane rural roads were analyzed. The data collected in an experimental investigation on a segment of two-lane state road DC1 in Croatia were used, in which the drives of a representative sample of drivers were recorded with a high frequency GPS device. The multiple linear regression was used to investigate the possible influence of geometric characteristics of the road on the driver's choice of path radius and no statistically significant correlation was found. The analysis showed that the vehicle path radii were mainly smaller than curve radius (on average for 12%). The largest deviations of vehicle path radii from designed values were found on sharper curves ($R < 150$ m), indicating an increased risk of skidding which may be related to the fact that sharp curves are associated with increased accident rates.

Keywords: vehicle path radius, horizontal curve, design consistency

1. Uvod

Sudionici, vozila i obilježja ceste tri su najvažnija čimbenika za sigurnost prometa, a upravo *crne točke* prometnoga sustava ukazuju na činjenicu kako, osim pogrešaka samih vozača, obilježja ceste često mogu biti uzrok nesreće. Jedna od lokacija povećanoga rizika na kojoj se češće događaju prometne nesreće jest horizontalna krivina. Detaljnija istraživanja pokazala su kako postoji veza između broja prometnih nesreća i zakrivljenosti, odnosno učestalost prometnih nesreća raste sa smanjivanjem polumjera krivine, pri čemu je taj porast intenzivnije izražen kod krivina polumjera manjega od 200 m (Slika 1).



Slika 1. Broj prometnih nesreća u odnosu na polumjer krivine [1]

Prometne nesreće nastaju zbog nekonzistencije toka trase, odnosno kada obilježja ceste nisu usklađena s očekivanjima vozača. Većina prijašnjih studija o konzistenciji i sigurnosti na cesti zasnivaju se na operativnim brzinama, dok je zabilježeno samo nekoliko istraživanja u kojima su proučavani polumjeri stvarnih putanja vozila u horizontalnim krivinama [2–7]. Stoga su u ovom radu analizirani polumjeri putanje vozila prikupljeni eksperimentalnim istraživanjem na dionici dvotračne izvangradske ceste, koje je provedeno u sklopu doktorske disertacije Maljković [8].

2. Metodologija prikupljanja podataka

Radi prikupljanja podataka o stvarnome ponašanju vozača provedeno je eksperimentalno istraživanje na 24 km dugoj dionici državne ceste DC1 (Slika 2), u sklopu kojega su snimane vožnje reprezentativnoga uzorka vozača, odnosno ostvarene brzine i izvedeni polumjeri putanje vozila. U istraživanju je sudjelovalo 20 vozača različite dobi i vozačkoga iskustva koji su prošli analiziranu dionicu u oba smjera, vozeći svoje osobne automobile opremljene visokofrekventnim GPS uređajem. Riječ je o dvotračnoj izvangradskoj cesti s relativno malim prometnim opterećenjem (PGDP iznosi oko 1400 voz/dan) te bez priključaka važnijih cesta, što je olakšalo prikupljanje podataka ostvarenih u uvjetima slobodne vožnje. Istraživanje se provodilo u optimalnim vremenskim uvjetima (dnevna vožnja i suh kolnik).



Slika 2. Prikaz analizirane dionice DC1 [8]

GPS uređaj precizno detektira položaj vozila i kut otklona od sjevera u svakoj desetinki sekunde, na temelju čega se računaju polumjeri putanje vozila:

$$R = \frac{57.3 \cdot L}{D_C} \quad (1)$$

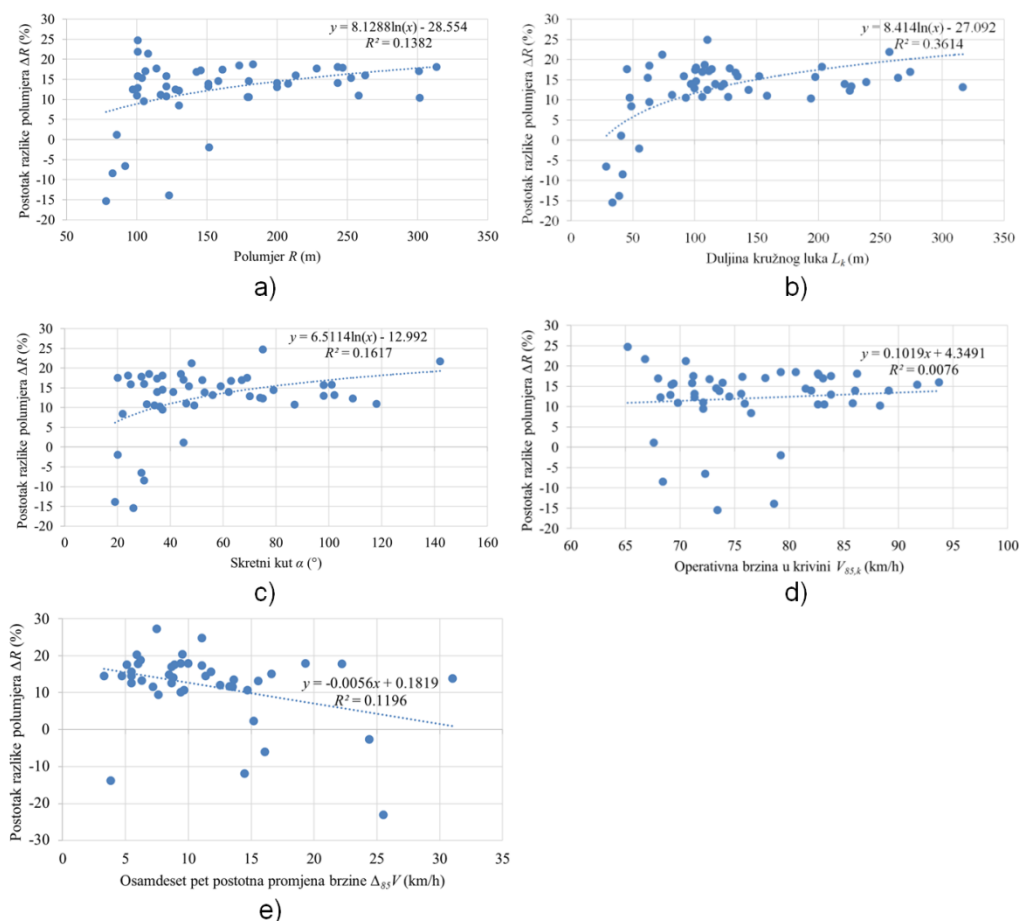
gdje je L (m) duljina kružnoga luka, a D_C (°) promjena kuta otklona od sjevera. Pri tome su analizirane samo oštrije krivine (polumjera od 80 do 315 m) koje su odabrane za temu istraživanja ovoga rada zbog izražene veće stope prometnih nesreća kao i činjenice kako se preciznost metoda za određivanje polumjera putanje vozila povećava sa smanjivanjem polumjera krivine [9]. Kao relevantan polumjer putanje vozila za pojedinu krivinu i pojedinu testnu vožnju odabrana je vrijednost najmanjega konstantnog polumjera, odnosno relativno konstantna vrijednost polumjera (odstupanja zakrivljenosti do 5 %) s duljinom vožnje od najmanje 0,5 sekunde. Prema preporuci nekih autora ([2], [10]) za kritični polumjer putanje vozila pojedine krivine odabrana je 15-postotna vrijednost R_{15} (polumjeri putanje vozila kod samo 15 % vozača manji su od R_{15}).

3. Analiza i rezultati

Radi osiguravanja konzistencije i sigurnosti obilježja ceste trebaju biti usklađena s očekivanjima vozača. Konzistenciju je najlakše provjeriti uspoređivanjem vrijednosti parametara kojima se može opisati stvarno ponašanje vozača (primjerice kritičan polumjer putanje vozila) i odgovarajućih vrijednosti koje se koriste pri projektiranju (polumjer u osi ceste). Podatci snimljeni na terenu korišteni su za usporedbu polumjera osi ceste i kritičnih 15-postotnih polumjera putanja vozila te za proučavanje mogućega utjecaja brzine vozila, promjene brzine i geometrijskih obilježja ceste na vozačev izbor putanje vozila. Analiza je provedena pomoću višestruke linearne regresije, a za zavisnu varijablu odabran je postotak razlike između polumjera krivine i kritičnoga 15-postotnog polumjera putanje vozila kako bi se mogle analizirati horizontalne krivine različitih zakrivljenosti:

$$\Delta R = \frac{R - R_{15}}{R} \cdot 100 \quad (2)$$

Razmatrane su sljedeće nezavisne varijable: 85-postotna brzina u krivini $V_{85,k}$ (km/h), 85-postotna promjena brzine $\Delta 85V$ (km/h), polumjer krivine R (m), uzdužni nagib s (%), duljina kružnoga luka L_k (m), duljina pristupnoga pravca L_{p1} (m), duljina pravca iza krivine L_{p2} (m) i duljine prijelaznica prije kružnoga luka i poslije kružnoga luka L_{pr1} , L_{pr2} (m). Osim navedenih geometrijskih obilježja ceste, kao nezavisna varijabla uzeta je i promjena brzine između pristupnoga elementa i krivine $\Delta 85V$ (km/h) kako bi se razmotrilo i ponašanje vozača na prijelazu između dvaju elemenata. Prije provođenja višestruke regresijske analize istraženi su pojedinačni utjecaji svake nezavisne varijable te je pokazano kako je utjecaj geometrijskih obilježja okolnih elemenata na ΔR zanemariv. Stoga su u nastavku prikazani samo dijagrami rasipanja za sljedeće varijable: polumjer krivine (Slika 3 a), duljina kružnoga luka (Slika 3 b), skretni kut (Slika 3 c), operativna brzina u krivini (Slika 3 d) i 85-postotna promjena brzine – smjer sjever – jug (Slika 3 e).



Slika 3. Pojedinačni dijagrami rasipanja postotka razlike polumjera u odnosu na: a) polumjer krivine; b) duljinu kružnoga luka; c) skretni kut; d) operativnu brzinu u krivini; e) 85-postotnu promjenu brzine (smjer sjever – jug) [8]

Iz rezultata sa Slike 3 može se zaključiti kako odabrane nezavisne varijable ne utječu bitno na ΔR , a najveći utjecaj ima L_k . Ipak, iz provedene analize mogu se uočiti određene

pravilnosti u ponašanju vozača. Općenito, vozači u krivinama izvode polumjere putanje manje od polumjera osi ceste, neovisno o smjeru vožnje, a u prosjeku je kritični polumjer putanje vozila 12 % manji od polumjera krivine. Slični rezultati dobiveni su i u istraživanju [6] odnosno [7].

Najveći raspon polumjera putanje vozila uočen je u oštrim krivinama (Slika 3 a). Radi udobnije vožnje u oštrim i kratkim krivinama s malim skretnim kutovima većina vozača „siječe krivinu“ izvodeći polumjer putanje veći od polumjera u osi ceste (Slika 3 a, b i c). Izvođenje takvih radnji u određenoj mjeri može se objasniti i ograničenom preglednošću koja je karakteristična za krivine malih polumjera. Istodobno, u krivinama polumjera manjih od 150 m uočene su najveće pozitivne vrijednosti ΔR od čak 25 %. Budući da su to krivine malih polumjera, odgovaraju im niže vrijednosti operativnih brzina, neovisno o duljini krivine i skretnome kutu. Kako bi što udobnije prošli oštru krivinu, vozači često podcijene stvarnu zakrivljenost. Negdje duž krivine uočava se pogreška koja se najčešće korigira manje ili više naglim zakretanjem upravljača što rezultira izvođenjem polumjera putanje manjega od polumjera krivine. Manji polumjer putanje vozila uzrokuje porast centripetalnoga ubrzanja, a time i porast potrebnoga bočnog trenja. U lošim uvjetima kolnika i kod brzina neprilagođenih geometriji krivine takvi nagli zaokreti upravljača mogu rezultirati nestabilnošću vozila i potencijalno mogu dovesti do prometne nesreće. Najizraženija nekonzistentnost polumjera putanja (najveće vrijednosti ΔR) uočena je u krivinama manjih polumjera ($R < 150$ m) što ukazuje na povećani rizik od proklizavanja, a može se povezati i s povećanom stopom prometnih nesreća u krivinama manjih polumjera (Slika 1).

Nakon pojedinačnih regresijskih analiza provedena je višestruka linearna regresija. Budući da je analizirano više nezavisnih varijabli, potrebno je odrediti koje su od njih najvažnije. Jedna od metoda izbora nezavisnih varijabli u regresijskome modelu jest stupanjska regresija (engl. *stepwise regression*) kojom je dobiven model postotka razlike između polumjera krivine i kritičnoga 15-postotnog polumjera putanje vozila. Analizom pojedinačnih dijagrama rasipanja (Slika 3 a, b i c) uočeno je kako bi za razmatrane nezavisne varijable R , L_k i α aproksimacija logaritamskoga oblika bila bolja od linearne. Stoga su prilikom provođenja višestruke regresijske analize upotrijebljene logaritamske vrijednosti navedenih varijabli. Kako je bilo i očekivano, s obzirom na individualne dijagrame rasipanja, stupanjska regresija rezultirala je samo duljinom kružnoga luka kao nezavisnom varijablom:

$$\Delta R = 8.41 \cdot \ln L_k - 27.09 \quad (3).$$

Ostale predložene nezavisne varijable isključene su iz modela jer je utvrđeno kako ne pridonose bitno sveukupnomu modelu. Razvijeni model pokazuje kako se postotak razlike između polumjera krivine i kritičnoga 15-postotnog polumjera putanje vozila povećava s porastom duljine kružnoga luka. Iako postoji određena zavisnost između postotka razlike polumjera i duljine kružne krivine, korigirani koeficijent determinacije od $\bar{R}^2 = 0,348$ pokazuje kako je ona slaba i nepouzdana.

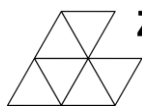
4. Zaključak

U ovome radu analizirano je ponašanje vozača u horizontalnim krivinama u smislu izvedenih polumjera putanje vozila na temelju podataka prikupljenih eksperimentalnim istraživanjem na dionici izvangradske dvotračne ceste. Primjenom višestruke regresijske analize istražen je moguć utjecaj geometrijskih karakteristika trase na vozačev izbor putanje vozila. Iako provedena analiza nije rezultirala statistički bitnim modelom, ustanovljeno je kako vozači uglavnom izvode polumjer putanje vozila manji

od projektiranoga u osi ceste, neovisno o smjeru vožnje. Uočena odstupanja više su izražena u oštrim krivinama. Manji izvedeni polumjer putanje podrazumijeva veće centripetalno ubrzanje, odnosno porast potrebnoga bočnog trenja. Stoga u uvjetima lošega stanja kolnika i pri neprilagođenoj brzini u oštroj krivini lako može doći do gubitka poprečne stabilnosti vozila i potencijalno do prometne nesreće. Prema tome najvažniji zaključak provedene analize jest činjenica kako se uzrocima prometnih nesreća u krivinama, do kojih najčešće dolazi uslijed gubitka kontrole ili stabilnosti vozila zbog prekoračenja raspoloživih vrijednosti bočnoga trenja, ne može pripisati samo neprimjerena brzina. Uzrok se može pronaći i u vozačevu ponašanju, odnosno u izvođenju polumjera putanje vozila u krivini.

Literatura

- [1] PIARC World Road Association, Road Safety Manual, 2003.
- [2] Said, D., Abd El Halim, A. O., Hassan, Y.: Methodology for driver behaviour data collection and analysis for integration in geometric design of highways, Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design, June 2.-5. 2009; Valencia, Španjolska, 2009.
- [3] Fitzsimmons, E. J. et al.: Determining vehicle operating speed and lateral position along horizontal curves using linear mixed-effects models, Traffic Injury Prevention, 2013; 14(3): 309–321. doi: 10.1080/15389588.2012.701356.
- [4] Wong, Y. D., Nicholson, A.: Speed and lateral placement on horizontal curves, Road and Transport Research, 1993; 2(1): 74–87.
- [5] Wong, Y. D., Nicholson, A.: Driver behaviour at horizontal curves: risk compensation and the margin of safety, Accident Analysis and Prevention, 1992; 24(4): 425–436. doi: 10.1016/0001-4575(92)90053-L.
- [6] Glennon, J. C., Weaver, G. D.: Highway curve design for safe vehicle operations, Highway Research Record, 1972; 390; 15-26.
- [7] Glennon, J. C., Neuman, T. R., Leisch, J. E.: Safety and operational considerations for design of rural highway curves, Report FHWA-RD-86-035, Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, Washington, DC, 1983.
- [8] Maljković, B.: Unapređenje kriterija konzistencije u horizontalnim krivinama vangradskih dvotračnih cesta uz primjenu bicikl-modela vozila te realnih parametara ponašanja vozača, doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2021.
- [9] Carlson, P. J., Burriss, M., Black, K., Rose, E. R.: Comparison of radius-estimating techniques for horizontal curves, Transportation Research Record, 2005; 1918(1): 76–83. doi: 10.3141/1918-10.
- [10] Nicholson, A.: Superelevation, side friction, and roadway consistency, Journal of Transportation Engineering, 1998; 124(5): 411–418. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1998)124:5(411).



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.12>

MODELIRANJE PRODORA MORSKE VODE U OBALNI VODONOSNIK RIJEKE NERETVE

MODELING OF SEAWATER INTRUSION INTO RIVER NERETVA COASTAL AQUIFER

Iva Matić¹, Veljko Srzić²

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, iva.matic@gradst.hr

(2) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, veljko.srzic@gradst.hr

Sažetak

Iako su istraživanja na području donjega toka rijeke Neretva započeta prije više od 50 godina, do danas nije uspostavljen model kojim bi se pouzdano simulirala dinamička svojstva slanosti u ovome obuhvatu. Ovaj rad prikazuje teorijsku osnovu i implementaciju lokalnih uvjeta u 3D numeričkome modelu SEAWAT kojim se simuliraju nestacionarna piezometarska stanja i karakteristike slanosti podzemnih voda u obuhvatu. Modelom je obuhvaćen donji tok rijeke Neretve, implementirane su karakteristike geoloških slojeva te rubni i početni uvjeti u skladu s raspoloživim *in situ* podacima monitoringa. Kalibracija parametara modela provedena je pomoću terenskih mjerenja i raspoloživih vremenskih serija s postojećih piezometara. Rezultati dobiveni modeliranjem u sušnome razdoblju hidrološke godine pokazuju bitnu korelaciju s mjerenim podacima.

Ključne riječi: SEAWAT, Neretva, prodor soli

Abstract

Even though river Neretva valley aquifer has been objective of different research groups more than 50 years, a model that would reliably simulate the dynamic salinity properties on this site has not been established. This paper presents the theoretical basis and implementation of local conditions in the 3D numerical model of SEAWAT, which simulates non-stationary piezometric states and groundwater salinity characteristics on the site. The model covers the lower course of the Neretva River. The characteristics of geological layers, boundary and initial conditions were implemented in accordance with the available *in situ* monitoring data. Calibration of model parameters was performed using field measurements and available time series from existing piezometers. The results obtained by modelling in the dry period of the hydrological year show a significant correlation with the measured data.

Keywords: SEAWAT, Neretva coastal system, seawater intrusion

1. Uvod

U većini obalnih područja postoji veza između morske i podzemne vode koja negativno utječe na produktivnost usjeva. Za analizu i prevenciju štetnoga djelovanja uzrokovana prodorom slane vode u vodonosnik potrebno je napraviti model koji će biti u mogućnosti uspješno prikazati trenutačno stanje na terenu i definirati parametre koji dominantno utječu na prodor slane vode. Na temelju modela postojećega stanja moguće je definirati promjene na području domene koje bi dale uvid u moguće promjene polja slanosti. Za potrebe izrade takva modela razvijen je MODFLOW, 3D model konačnih razlika (McDonald, Harbaugh, 1988.) i MT3DMS (Zheng, 1990). Zhu i dr. (2020) u svome radu prikazuju primjenu SEAWAT-a na modelu koji pokriva domenu od 170 km² u Kini. Zghini i dr. (2019) i Pappa i dr. (2017) definiraju parametre za MODFLOW i SEAWAT za područje Sredozemnoga mora, odnosno za područje Tunisa i Grčke, te predviđaju promjene u polju slanosti uslijed povećanja crpljenja na području zahvata. Slična koncepcija modela u Jadranskomu moru prikazana je u [6]. Područja obuhvata modela prikazanoga u ovome radu jesu dolina i donji tok rijeke Neretve. Prikazan je konceptualni model koji definira postojeće stanje na terenu za dva scenarija, ljetno i zimsko razdoblje, te su definirana polja slanosti koja utječu na kvalitetu vode za navodnjavanje.

2. Metodologija

2.1. Teorijske postavke modela

Za modeliranja pronosa slane vode u vodonosnik na području donjega toka rijeke Neretve korišten je SEAWAT [7]. SEAWAT je trodimenzionalni numerički model koji se koristi za simulacije prodora slane vode, a temelji se na spajanju MODFLOW-a za izračun tečenja podzemne vode promjenjive gustoće u vodonosniku i MT3DMS-a za izračun transporta otopljenih tvari. Osnovne jednadžbe koje rješava SEAWAT dane su izrazima (1) i (2). Jednadžba (1) rješava problem protoka podzemne vode promjenjive gustoće, dok jednadžba (2) rješava problem pronosa otopljenih tvari.

$$\nabla \cdot \left[\rho \frac{\mu_0}{\mu} \mathbf{K}_0 \left(\nabla h_0 + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \nabla z \right) \right] = \rho S_{s,0} \frac{\partial h_0}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho_s q'_s \quad (1)$$

ρ_0 – gustoća fluida za određenu koncentraciju i temperaturu [kg m⁻³]
 μ – dinamička viskoznost [kg m⁻¹ s⁻¹]
 \mathbf{K}_0 – tenzor hidrauličke vodljivosti materijala zasićenoga referentnom tekućinom [kg s⁻¹]
 h_0 – hidraulički tlak mjeren u odnosu na referentni fluid određene koncentracije i temperature [m]

$S_{s,0}$ – specifična zapremnina, definirana kao količina vode koja se ispušta iz zapremnine po jedinici volumena po padu h_0 [m⁻¹]
 t – vrijeme [s]
 θ – poroznost [-]
 C – koncentracija soli [kg m⁻³]
 q'_s – izvor ili ponor fluida s gustoćom ρ_s [s⁻¹]

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d^k}{\theta} \right) \frac{\partial (\theta C^k)}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta D \cdot \nabla C^k) - \nabla \cdot (q C^k) - q'_s C_s^k \quad (2)$$

ρ_b – gustoća obujma (masa krutih tvari podijeljena s ukupnim volumenom) [kg m⁻³]

K_d^k – distribucija koeficijenta otopljene tvari k [m³ kg⁻¹]

C^k – koncentracija otopljene tvari k [kg m⁻³]

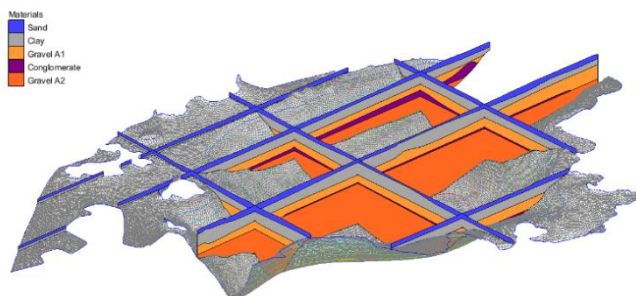
D – tenzor koeficijenta hidrodinamičke disperzije [m² s⁻¹]

q – specifično otpuštanje [m s⁻¹]

C_s^k – koncentracija izvora ili ponora [kg m⁻³] otopljene tvari k

2.2. Postavke modela i geološka definicija

Područje modela omeđeno je morskom linijom na zapadu, granicom stijenske mase na jugu i sjeveru te područjem Opuzena na istoku. Horizontalna diskretizacija modela iznosi 50 x 50 m. Vertikalna diskretizacija modela u svezi je s rasporedom geoloških slojeva u modelu. U korištenome modelu usvojena je vertikalna diskretizacija s jedanaest slojeva od kojih prva dva predstavljaju sloj pijeska, dva sloja predstavljaju glinu, dva sloja plići sloj šljunka, jedan sloj konglomerat, a pet slojeva dublji sloj šljunka. Slojevi modela predstavljaju geološke slojeve, a Slika 1 prikazuje raspored navedenih geoloških slojeva u modelu.



Slika 1. Raspored geoloških slojeva modela

Od 1962. do 2019. godine na području donjega toka rijeke Neretve izvedeni su geoelektrično sondiranje, 138 istražnih bušotina te geoelektrična tomografija. Karakteristike geoloških slojeva modela i njihov prostorni raspored dobiveni su na temelju tih podataka te na temelju istražnih radova u laboratoriju. Tablica 1 prikazuje vrijednosti parametara korištenih u modelu.

Tablica 1. Karakteristike geoloških slojeva korištene u modelu

Geološki sloj	Max. dubina (m)	Min. dubina (m)	Kh (m/s)	Kv (m/s)	Ss	Sy	Poroznost
Pijesak	10,0	- 10,0	1e ⁻⁴	1e ⁻⁵	0,00004	0,25	0,3
Glina	- 10,0	- 30,0	1e ⁻⁸	1e ⁻⁹	0,0055	0,02	0,45
Šljunak	- 30,0	- 45,0	1e ⁻³	1e ⁻⁴	1e ⁻⁶	0,25	0,3
Konglomerat	- 45,0	- 48,0	1e ⁻¹⁵	1e ⁻¹⁶	1e ⁻¹⁵	1e ⁻¹⁵	0
Šljunak	- 48,0	- 150,0	1e ⁻³	1e ⁻⁴	1e ⁻⁶	0,25	0,3

2.3. Rubni i početni uvjeti modela

Za postavljeni model bilo je potrebno definirati rubne uvjete za tečenje i rubne uvjete za transport. Prvo su definirani rubni uvjeti za tečenje. Stijena koja se rasprostire na cijelome području donjega toka rijeke Neretve na dubini od 5 do -165 m definira nepropustan rubni uvjet. Morski rubni uvjet, za koji su korištena očitavanja razine mora s mareografa, definiran je na području morske linije koju obuhvaća model. Rubni uvjet na području Opuzena, istočne granica modela, definiran je određenim protokom procjeđivanja podzemnih voda. Razina vodnoga lica rijeke Neretve definirana je rubnim uvjetom na dvjema lokacijama. Istočni rubni uvjet rijeke Neretve odgovara očitavanju limnigrafa postavljenoga kod Opuzena, dok je zapadni rubni uvjet očitavanje s mareografa. Rubni uvjeti za Malu Neretvu i veće kanale koji su obuhvaćeni modelom definirani su geodetskim očitavanjima s terena i režimom rada crpnih stanica Modrič i Vidrice.

Rubni uvjet za transport za morski rubni uvjet zadana je vrijednost koncentracije koja iznosi 36 g/l i ravnomjerno je raspodijeljena na cijelome zapadnom rubu modela. Rubni uvjet za transport na istočnome rubu domene modela za Malu Neretvu i kanale jest $\frac{dc}{dx} \neq 0$ i $\frac{dc}{dz} \neq 0$. Za rijeku Neretvu definirane su dvije grupe rubnih uvjeta za transport, jedna za zimsko, a druga za ljetno razdoblje. Za ljetno razdoblje rubni uvjet transporta zadana je vrijednost koncentracije koja iznosi 36 g/l, dok ta vrijednost u zimskome razdoblju iznosi 0 g/l.



Slika 2. Rubni uvjeta tečenja u modelu



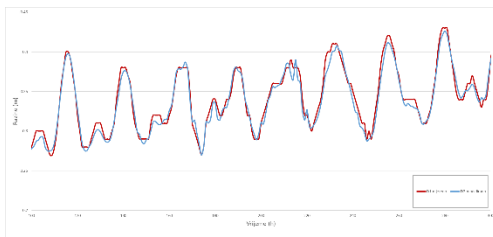
Slika 3. Rubni uvjeti transporta u modelu

Početni uvjeti modela za tečenje odgovaraju rasporedu piezometarskih visina dobivenih za stacionarno stanje modela na području domene modela. Početni uvjet modela za transport odgovara vrijednosti koncentracije dobivene za stacionarno stanje modela.

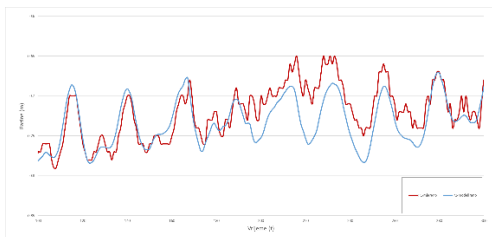
3. Rezultati

3.1. Rezultati tečenja u modelu

Slike 4 i 5 prikazuju mjerene i modelirane vrijednosti piezometarske visine na lokacijama D2 i P1, dobivene navedenom postavkom modela. Uočava se bolja podudarnost mjerene i modelirane vrijednosti u dubokome piezometru. Srednja vrijednost, visina amplitude i kašnjenje signala jako dobro opisuju stanja u dubokim piezometrima. Razlike koje se javljaju na plitkim piezometrima moguće je pripisati utjecaju vanjskih čimbenika, kao što je rad crpnih stanica, i utjecaju evapotranspiracije, koji nisu dio trenutačno razvijenoga modela.

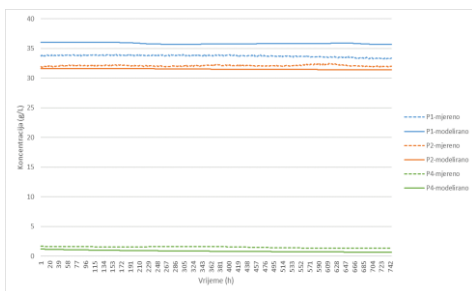


Slika 4. Prikaz mjerene i modelirane vrijednosti piezometarske visine na lokaciji D2

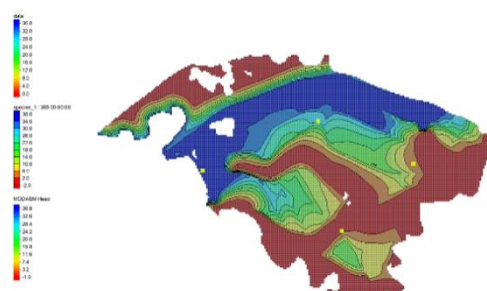


Slika 5. Prikaz mjerene i modelirane vrijednosti piezometarske visine na lokaciji P1

Slika 6 prikazuje odnos mjerene i modelirane koncentracije slanosti u plitkim piezometrima. Modelirane vrijednosti slanosti na plitkim piezometrima u skladu su s mjerenim vrijednostima. Modelirana vrijednost slanosti na piezometrima P1 i P4 nešto je veća od mjerene vrijednosti, dok je u P2 ta vrijednost nešto manja od mjerene vrijednosti. Slika 7 prikazuje raspored koncentracije soli u površinskom sloju modela za ljetno razdoblje. Početni uvjet za stacionarno stanje ovoga modela jest koncentracija soli u rijeci Neretvi od 36 g/l. U ljetnome razdoblju uočava se kako se povećana koncentracija soli može zabilježiti na gotovo cijelome području domene. Područja Male Neretve i melioracijskoga podsustava Jasenska, koji imaju veće vrijednosti piezometarske visine, ne bilježe povećanje koncentracije soli. Uzimajući u obzir dobivene vrijednosti piezometarskih visina i vrijednosti koncentracija, moguće je zaključiti kako model uspješno simulira postojeće stanje.



Slika 6. Prikaz mjerene i modelirane koncentracije soli u plitkim piezometrima



Slika 7. Raspored koncentracije soli u površinskom sloju modela za ljetni period

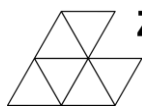
4. Rasprava i zaključci

Nakon usporedbe vrijednosti dobivenih rezultata iz modela s vrijednostima mjerenja s terena moguće je definirati kapacitet modela za opis piezometarskih stanja i polja slanosti. Na opis piezometarskih stanja u modelu veliku ulogu igra definiranje karakteristika geoloških slojeva te su se u procesu kalibracije i verifikacije te vrijednosti prilagodile kako bi se postiglo bitnije podudaranje s mjerenim vrijednostima. Utjecaj modela na opis polja slanosti očituje se u definiranju veličine ćelije modela, a naročito u definiranju vertikalne diskretizacije modela. S odabranim slojevima modela i veličinom ćelija nije bilo moguće definirati prijelazni sloj slanosti te je za detaljniji opis polja slanosti potrebno redefinirati vertikalnu diskretizaciju slojeva modela i prilagoditi je skali polja

slanosti. Dodavanjem dodatnih parametara u model, kao što je rad crpnih stanica, proces evapotranspiracije i režima rada kanala, moguće je doći do pouzdanijega konceptualnog modela i dodatne sličnosti mjerenih i modeliranih vrijednosti. Nakon definiranja postojećega stanja u modelu potrebno je analizirati scenarije kojima se predviđaju klimatske promjene i budući zahvati u obuhvatu. Analizom takvih scenarija moguće je odrediti njihovu učinkovitost kada je riječ o zaštiti od zaslanjivanja te predvidjeti mjere kojima bi se očuvala kvaliteta vode za navodnjavanje.

Literatura

- [1] McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W.: A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, 1988, 10.3133
- [2] Zheng, C.: MT3D, A modular three-dimensional transport model for
- [3] simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, 1990
- [4] Zhu, S.; Zhou, Z.; Guo, Q.; Ma, J.: A Study on the Cause of Layered Seawater Intrusion in the Daqing River Estuary of Liaodong Bay, China. Sustainability 2020, 12, 2842. <https://doi.org/10.3390/su12072842>
- [5] Zghibi, A., Mirchi, A., Zouhri, L. et al. Implications of groundwater development and seawater intrusion for sustainability of a Mediterranean coastal aquifer in Tunisia. Environ Monit Assess 191, 696 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7866-5>
- [6] Pappa, A., Dokou, Z. and Karatzas, G.: Saltwater intrusion management using the SWI2 model: application in the coastal aquifer of Hersonissos, Crete, Greece. DESALINATION AND WATER TREATMENT., 2017., 99. 49-58. 10.5004/dwt.2017.21550.
- [7] Colombani, N., Osti, A., Volta, G. et al.: Impact of Climate Change on Salinization of Coastal Water Resources. Water Resour Manage 30, 2483–2496 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1292-z>
- [8] Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., and Guo, Weixing, 2007, SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.13>

IDENTIFICIRANJE PROMJENA U ARHITEKTONSKOME PROJEKTIRANJU I URBANIZMU UZROKOVANIH ELEKTRIČNIM AVIONIMA

IDENTIFICATION OF CHANGES IN ARCHITECTURAL DESIGN AND URBANISM CAUSED BY ELECTRIC PLANES

Samantha Pavić

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, spavic@gradst.hr

Sažetak

Tehnološki napredak avionske industrije i prateća promjena pogonske i tehnološke paradigme, to jest prijelaz na električne letjelice, neminovno će dovesti i do ključnih promjena u arhitekturi, prvenstveno u aspektu pristupa projektiranju aerodroma i redefiniciji za to relevantnih projektantskih parametra, ali i dalje, u načinu mišljenja i funkcioniranja samoga grada. Naime, promjena avionske tehnologije i paradigme prometa nužno će polučiti promjene u cjelokupnoj prometnoj infrastrukturi i načinu prometovanja u gradu, a time i u načinu projektiranja i promišljanja te arhitekture i urbanizma grada. U istraživanju koriste se Le Corbusierove metode analize zrakoplova koje se primjenjuju na dva tipa električnih letjelica: eVTOL i električni avion. Cilj rada jest naglasiti važnost odnosa između promjene u tehnologiji pogona aviona i arhitektonskoga projektiranja te istražiti kako će se razvoj električne letjelice reflektirati ne samo na koncept i projektiranje aerodroma nego i na cjelokupnu budućnost prometne organizacije i funkcioniranja grada.

Ključne riječi: električni avion, eVTOL, arhitektonsko projektiranje, urbanizam

Abstract

Technological advancement of the aircraft industry followed by the development of electric propulsion and technological paradigm towards the transition to electric aircraft will inevitably lead to key changes in architecture, primarily in terms of approach to airport design and redefinition of relevant design parameters, but also in the way of redefining the city and its functioning. Therefore, the advancement of aircraft technology and the transportation paradigm will result in shifts within the transportation infrastructure and significant updates regarding the traffic in the city. Overall the changes will lead to the redefinition of the design approach applied to the city and its urbanism. Le Corbusier's aircraft analyses are used in the research as study methods and are applied to two types of electric aircraft: eVTOL and electric airplanes. This paper aims to emphasize the importance of the relationship between changes in aircraft propulsion technology and architectural design. In addition, the goal is to explore how the development of electric aircraft will reflect not only on the concept and design of the airport but also on the overall future of transport organization and city functioning.

Keywords: electrical airplane, eVTOL, architecture, urbanism

1. Uvod

U razdoblju od 1920. do 1935. godine Le Corbusier temelji svoj teorijski rad upravo na zapažanju promjena i redefiniciji arhitekture gledajući kroz prizmu napretka tehnologije. Njegove analize izuma koriste se kao model u svrhu sagledavanja dalekosežnosti posljedica promjene paradigme u avionskoj industriji u pogledu projektiranja aerodroma, a i cjelokupnoga grada, u smislu promijenjene prometne infrastrukture i načina prometovanja u gradu. Svoju temeljnu misao *Eyes which do not see* [1] Le Corbusier različito definira kroz prizmu analiziranja i povezivanja triju transportnih izuma (brod, avion, automobil) s arhitekturom te donosi zaključke o definiranju standarda u odnosu na modernu arhitekturu i njezinu definiciju. Uvidjevši promjene u urbanizmu uzrokovane transportnim izumima, Le Corbusier analogno postavlja arhitektonsku analizu kriterija projektiranja i detektira urbanističke promjene. Stoga se njegove metode komparacije i analize primjenjuju za identifikaciju i vrjednovanje arhitektonsko-urbanističkih kriterija uzrokovanih napretkom tehnologije električnih aviona.

1.1. Brod

Izum broda Le Corbusier uspoređuje s kućom, gdje brod, osim što je prijevozno sredstvo, ima jedinstvo u materijalnosti i grupirane konstrukcijske elemente. Kao rezultat, brod ima lakšu konstrukciju, lišen je pojma stilova, s bitno većim otvorima i upadom prirodnoga svjetla [1]. Metodom komparacije broda i kuće Le Corbusier dolazi do zaključka o jednostavnosti postavke broda te detektira kvalitetnije stupnjeve performansi broda u odnosu na kuću (svjetlost, prirodni materijali, ventilacija). Iz Le Corbusierove studije broda zaključuje se kako brod nije samo izum koji funkcionira u svrhu prijevoza, nego je tvornički produkt s testiranim performansama koje bi trebalo implementirati u arhitektonsko projektiranje radi postizanja kvalitete življenja u prostoru. Ključni metodološki kriteriji su: jednostavnost postavki, vrjednovanje performansi, efektivna materijalnost i održivost.

1.2. Avion

U aspektu arhitekture lekciju o avionu Le Corbusier temelji na učinkovitosti definiranja problema i pronalasku rješenja [1]. Kada je riječ o avionu, definicija problema po Le Corbusieru nije bila u rješavanju propulzije avionskoga motora, nego u pretpostavci kako će u manje od deset godina cijeli svijet letjeti [1]. Avion je prijevozno sredstvo ljudi, robe, ali istovremeno Le Corbusier naglašava kako ljudi njegova vremena nisu mogli pojmiti vlastite povlastice koje su postignute komercijalizacijom zračnih linija. Smatra kako u arhitekturi problem nije jasno definiran, stoga on navodi smjernice s kojima bi, logikom pristupa avionu, definirao standardizaciju projektiranja koja je lišena nepotrebnih karakteristika radi funkcionalnosti.

Kroz urbanističku perspektivu avion za Le Corbusiera otvara novi standard mjerenja te mogućnost sagledavanja i analize pogrešaka u projektiranju kao i mogućnost budućega planiranja uzimajući u obzir zračnu perspektivu. U ovoj lekciji Le Corbusier zaključuje kako pojedina gradska naselja moraju biti srušena te novi gradovi moraju biti izgrađeni uvažavajući kriterije i greške koje omogućuje *doba zrakoplova*, odnosno vožnja avionom [2]. Le Corbusier smatra kako je čovječanstvo gradilo gradove temeljene na stvaranju novca i zaradi, zanemarujući kvalitetu življenja i principe urbanizma te naglašavajući omjer zelenih površina u odnosu na izgrađenost grada [2]. Ključni metodološki kriteriji su: nova percepcija, redefinicija urbanizma i arhitektonskoga projektiranja.

1.3. Automobil

Le Corbusier definira automobil kao objekt s jednostavnom funkcijom (putovanje) i kompliciranim ciljevima (komfor, otpornost, pojavnost), što je dovelo industriju do apsolutne potrebe za standardizacijom [1]. Standardizacija je, stoga, evoluirala s dva različita cilja: brzina i komfor. U oba slučaja Le Corbusier navodi kako to nije u svezi s antičkom sporom kočijom, odnosno smatra kako izum otvara nove mogućnosti te je potrebna prilagodba. Prema Le Corbusieru *standard je stvar logike, analize i precizne studije: baziran na problemu koji je jasno definiran. Standard je definitivno temeljen na eksperimentu* [1]. Le Corbusier stoga jasno koncipira standardizaciju kao ključan čimbenik za automobil, temeljen na analizi i eksperimentu, te odlazi korak dalje uvođenjem razine perfekcije. U ovome pojmu jasno daje do znanja kako je prvo potrebno postaviti standard kako bi se postigla razina savršenstva, koja je dohvatljiva ako je problem jasno definiran [1]. Stoga je i arhitektura vođena standardizacijom. Ekstrahiraju se metodološke faze: definicija problema, analiza, eksperiment, standardizacija, perfekcija (razina komfora i brzine).

2. Primjena metodologije i identifikacija promjena u odnosu na električnu letjelicu

Brod: (metodološki kriterij)

1. jednostavnost postavki
2. vrjednovanje performansi
3. efektivna materijalnost i održivost.

Avion: (metodološki kriterij)

1. nova percepcija
2. redefinicija urbanizma i arhitektonskoga projektiranja.

Automobil: (metodološke faze)

1. definicija problema
2. analiza
3. eksperiment
4. standardizacija
5. perfekcija (razina komfora i brzine).

Za analizu električne letjelice uzimaju se eVTOL i električni zrakoplov s četiri inačice: suvremeni električni avion, hibridni modeli i budući model. Hibridni su modeli u konceptualnome i prototipnome razvoju. Osim kombinacije goriva i električne propulzije, druga vrsta hibridnoga modela odnosi se na kombinaciju motora na hidrogenski pogon i električnu energiju. Iako je model u potpunosti električan, suvremene baterije zasada nisu kapaciteta pohrane kako bi se budući model mogao primjereno analizirati [3]. Prema podacima iz Tablice 1 može se zaključiti kako je tranzicijska faza s hibridnoga na autonomni električni avion neminovna do 2035. godine, ali se mogu predvidjeti i relacije u odnosu na arhitektonsko projektiranje, redukciju plinova, CO₂, kao i potreba za elektranama, hidrogenskim hubovima i sl. U Tablici 1 prikazane su osnovne informacije električnih letjelica. Prema NASA-inu istraživanju redukcija štetnih plinova za STARC-ABL iznosi 10 %, *Boeing Sugar Volt* – 43,6 % (prosječno, ako se koriste obnovljivi izvori energije za punjenje baterije, redukcija iznosi – 58,9 %), dok redukcija za *Airbusov ZeroE* iznosi 100 % [11]. Razdoblje 2035. smatra se vremenom evolucije električnih aviona, dok se vrijeme nakon 2035. godine smatra revolucionarnim za budućnost avionske industrije [12].

Tablica 1. Usporedba eVTOL-a i električnih aviona

Tip letjelice	Baterija, motor, punjenje	Broj putnika	Maksimalna distanca (domet)	Brzina	Prvi let (godina)
eVTOL [4] (Lilium) [5]	36 x 320 kW Lithium-ion baterija, 80 % u 15 min 100% u 30 min	6 + 1 (pilot)	280 km	300 km/s	2025.
Električni avion Alice (Eviation) [6]	2 x 640 kW magniX 650 motor, 1 sat leta = 30 min punjenja	9 + 2 (piloti)	814 km	407 km/s	2023.
NASA STARC-ABL [7]	2 x Turbofan i generatori + električna propulzija na stražnjem motoru	154 putnika	14,310 km (Boeing 747)	0,8 Mach = 987 km/s	2035.
Hibridni model Boeing Sugar Volt [8]	2 x Turbofan + baterija električna energija održava motor prilikom letenja	150 putnika	6482 km 1666 km na bateriji	0,7 Mach = 864 km/s	2035.
Hibridni Airbus ZeroE turbofan [9]	2 x hidrogen Turbofan + hidrogen ćelija proizvodi električnu energiju	120-200 putnika	3704 + km	0,78 Mach = 963 km	2035.
Električni avion budućnosti [10]	Električna baterija	150 putnika	537 km	-	2035. – 2050.

2.1. eVTOL (electric vertical takeoff and landing)

Identifikacija promjena na temelju metodoloških kriterija:

1. projektiranje i osmišljavanje prostora u odnosu na tehnike punjenja baterije
2. identifikacija tehnika proizvodnje električne energije za snabdijevanje eVTOL-a
3. korištenje obnovljivih izvora energije
4. predviđanje adekvatnih prostora u gradu kao što su uzletno-sletni punktovi
5. zaštita od buke i redefinicija urbanističkih pravila za neposredne blizine vertiportova
6. definicija standarda postavljanja vertiportova u odnosu na jezgru grada, tipologiju naselja (stambeno naselje u odnosu na poslovni dio grada, povijesnu jezgru, rekreacijsku zonu i sl.)
7. redefinicija pročelja novih i postojećih objekata u odnosu na vertiportove u aspektu zaštite od buke i mogućnosti proizvodnje energije kroz održivi fasadni sustav
8. optimizacija korištenja cestovne infrastrukture i sagledavanje parametara prilagodbe s izvorima električne energije
9. omogućavanje više uzletno-sletnih mjesta u gradu
10. fokus na lokalni promet s manjim brojem putnika
11. promišljanje o postojećoj infrastrukturi i njezinim kapacitetima kao potencijalnim parkirnim zonama eVTOL-a, privremenom skladištenju i mjestu napajanja eVTOL-a
12. ukidanje manjih aerodroma implementacijom eVTOL sustava
13. predviđanje i osmišljavanje načina punjenja vertiportova kroz postojeću arhitekturu i buduće planiranje.

Primjer metodološkoga ispitivanja za eVTOL u odnosu na arhitekturu i urbanizam:

1. definicija problema (udaljenost, broj putnika, punjenje, buka u odnosu na grad)
2. analiza (predviđanje lokacija za postavljanje vertiportova)
3. eksperiment (anketa i analiza podataka o vertiportu, case study implementacija infrastrukture u gradu, odnosno u određene tipologije naselja)
4. standardizacija (redefinirati infrastrukturne potrebe, uvesti novu infrastrukturu)
5. perfekcija / razina komfora i brzine [reduciran broj putnika, custom-made putovanja, emisija plinova snižena u potpunosti, brzina putovanja (ista ili brža od sadašnjega standarda)]

/ manje gužve na aerodromima, zdrav okoliš, reorganizacija lokalnoga prometa, oslobađanje postojeće infrastrukture grada, predviđanje lokacija parkinga aviona i mjesta za punjenje u sklopu vertiporta].

2.2. Zrakoplov s električnim motorom

U usporedbi sa zapaženim promjenama arhitektonskih parametara eVTOL-a, kod električnoga zrakoplova zadržava se ključan infrastrukturni element, uzletno-sletna staza. Međutim, neminovna je supstitucija aerodromskih punktova za uzimanje goriva te popratnih spremnika goriva s izgradnjom sustava i infrastrukture za opskrbu električnom energijom, hidrogenskim hubovima i adekvatnim sustavima napajanja električnom energijom i vodikom. Prema *Airbusovu* istraživanju vodik za istu količinu energije ima samo 1/3 težine kerozina, ali je u izoliranim uvjetima volumenski četiri puta veći u usporedbi s kerozinom [13], što daje jasnu smjernicu za dizajniranje avionskoga spremnika vodika kao i za odgovarajuću infrastrukturu na aerodromu.

Identifikacija promjena na temelju metodoloških kriterija:

1. istražiti važnost izgradnje elektrana za napajanje električnih aviona u neposrednoj blizini aerodroma
2. međuovisnost elektrane i napajanja električnih aviona
3. predviđanje hidrogenskih hubova – koncept spremnika i adekvatno punjenje [14]
4. predviđanje dodatnoga prostora za ciklus punjenja baterije (na temelju primjera električnoga aviona *Alice*, za 30 minuta leta potrebno je 30 minuta punjenja)
5. redefinicija lokalnoga i međunarodnoga prometa u odnosu na kapacitet zrakoplova (broj putnika, maksimalan broj sati leta)
6. organizacija i preusmjeravanje lokalnoga prometa na eVTOL sustav
7. redukcija broja postojećih aerodroma u aspektu režima korištenja po načelu udaljenosti, kapacitetu trajanja leta i maksimalnoga broja putnika
8. broj putnika – isti kao i kod suvremenoga aviona (krajnji cilj standardizacije i komercijalizacije)
9. redukcija štetnih plinova (CO₂) / održivost.

Primjer metodološkoga ispitivanja za električni avion u odnosu na arhitekturu i urbanizam:

1. definicija problema (baterija aviona i dalje nije u potpunosti električna / potrebne su razne kombinacije izvora napajanja za fazu evolucije)
2. analiza (postojeće aerodromske infrastrukture u odnosu na promjenu aviona – hibridni i električni avion)
3. eksperiment (anketa i analiza podataka, *case study* implementacija infrastrukture na terminalu, npr. hidrogenski hub)
4. standardizacija (u prvoj fazi optimizirati kriterije punjenja te detektirati infrastrukturne promjene za hibridni električni model aviona)
5. perfekcija / razina komfora i brzine [optimalan broj putnika, emisija plinova svedena na minimum, brzina putovanja (ista ili brža od sadašnjega standarda) / manje gužve na aerodromima, održiv okoliš].

3. Zaključak

Pregled tehnoloških aspekata novih električnih letjelica i njihovih posljedica za prostor i nužnu infrastrukturu ključan je za sagledavanje nužnosti funkcioniranja odnosno mogućnosti implementacije sustava električnih aviona.

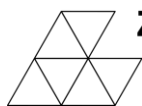
Novo prometovanje imaće potencijalne reperkusije na grad, novu arhitekturu i režim korištenja urbane infrastrukture. Pri tome može se pretpostaviti kako će doći do novih oblika

nove arhitekture ili kombinacije elemenata koje će arhitektura kao takva sadržavati da bi služila kao uzletno-sletna pista i/ili kanal za daljnje uključivanje u gradski promet.

Prema NASA-inu istraživanju eVTOL će trebati novu infrastrukturu kao i sustav funkcioniranja, dok će električni avioni koristiti postojeću infrastrukturu aerodroma. Neupitno je kako će eVTOL dovesti do kompletne promjene oblikovne paradigme nove arhitekture koja se naslućuje prema analiziranim podacima za letjelice poput eVTOL-a i *Alice*, kao i činjenice kako je implementacija sustava vertiportova predviđena za 2025. godinu. Premda će električni avion koristiti postojeću infrastrukturu, neminovno je pitanje reorganizacije korištenja postojeće infrastrukture u aspektu redukcije izgrađenosti i budućega razvoja samoga koncepta nadogradnje aerodroma kao i razvoja novih aerodroma. Također, ključan je cilj i minimiziranje emisije štetnih plinova, što se analizom utvrđenih podataka utvrđuje kao element globalne održive budućnosti. Očekivana je potreba prilagodbe tehnologije električnih letjelica i mogućnosti slijetanja i polijetanja, ali fokus daljnjega istraživanja jest zapažanje na koje će eventualne načine to promijeniti cjelokupnu arhitekturu i grad.

Literatura

- [1] Le Corbusier, *Towards New Architecture*, prvo Dover izdanje, Dover Publications Inc, 1986.
- [2] Le Corbusier, *Aircraft*, prvo izdanje, Trefoil Publications Ltd, 1935.
- [3] Insider, <https://www.businessinsider.com/electric-planes-future-of-aviation-problems-regulations-2020-3>, 05.07.2021.
- [4] Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/EVTOL>, pristupljeno: 01.06.2021.
- [5] Liliium, <https://liliium.com/jet>, pristupljeno: 03.03.2021.
- [6] Eviation, <https://www.eviation.co/aircraft/#Alice-Specifications>, pristupljeno: 03.03.2021.
- [7] NASA STARC-ABL, <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170012222> , <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170005612> pristupljeno: 09.07.2021.
- [8] Boeing Sugar Volt, <https://newatlas.com/boeing-sugar-volt-hybrid-aircraft/15915/>, pristupljeno: 09.07.2021.
- [9] Airbus Zero E, <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html#hydrogen>, <https://www.electrive.com/2020/09/21/airbus-is-planning-h2-commercial-aircraft/>, <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2020/10/hydrogen-fuel-cell-cross-industry-collaboration-potential-for-aviation.html>, <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2021/01/hydrogen-most-promising-zero-emission-technology.html>, pristupljeno: 07.07.2021.
- [10] IATA, <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>, pristupljeno: 07.07.2021.
- [11] NASA Electric Propulsion System Studies, <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160009274>, pristupljeno: 05.07.2021.
- [12] IATA, <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>, 12.07.2021.
- [13] Airbus zeroE, <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html>, 13.07.2021.
- [14] Hidrogen hubovi, <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2021/06/tomorrow-airports-future-energy-ecosystems.html>, pristupljeno: 08.07.2021.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.14>

KOEFICIJENT TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI TRADICIJSKE ZEMLJANE KUĆE IZ ISTOČNE HRVATSKE: STUDIJA SLUČAJA

THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF A TRADITIONAL EARTH HOUSE FROM EASTERN CROATIA: A CASE STUDY

Ana Perić¹, Ivan Kraus¹, Hrvoje Krstić²

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za materijale i konstrukcije, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, aperic@gfos.hr; ikraus@gfos.hr

(2) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za organizaciju, tehnologiju i menadžment, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, hrvoje.krstic@gfos.hr

Sažetak

Iako je zemljana arhitektura mnogo zastupljena u istočnome dijelu Republike Hrvatske, većina je postojećih građevina u derutnome stanju i ne koristi se. Do danas nije provedeno istraživanje svojstava zemljanoga materijala za izradu zemljanih kuća te ne postoje norme prema kojima bi se nove građevine projektirale, a postojeće sanirale. Na području istočne Hrvatske autori su proveli opsežno terensko istraživanje u kojem su prikupljeni uzorci tradicijskih materijala iz više kuća izrađenih od nabijene zemlje. U ovome radu obrađene su djelomično samo dvije tradicijske zemljane mješavine prikupljene iz jedne kuće u Aljmašu te su određeni koeficijent toplinske provodljivosti, početna vlažnost, vlažnost nakon određivanja koeficijenta toplinske propusnosti i prostorna gustoća. Ovaj rad predstavlja jedan od prvih koraka u definiranju toplinskih svojstava tradicijskih mješavina korištenih za izradu zidova od nabijene zemlje.

Ključne riječi: nabijena zemlja, vlažnost, koeficijent toplinske provodljivosti, prostorna gustoća

Abstract

Even though earthen architecture is highly present in the eastern part of Republic of Croatia, most of the existing buildings are highly deteriorated and out of use. To date, no research has been conducted on the properties of earthen material used for construction of earthen houses or had any design and preservation acts been proclaimed. Authors have conducted extensive field research in Eastern Croatia, during which samples of traditional material were collected from rammed earth houses. In this study, two traditional earthen mixtures collected from houses in Aljmaš are presented, for which thermal conductivity coefficient, initial moisture content and moisture content after determining thermal conductivity coefficient, as well as bulk density, were

determined. This study represents one of the first steps in defining the thermal properties of traditional mixtures used for building rammed earth walls.

Keywords: rammed earth, moisture content, thermal conductivity coefficient, bulk density

1. Uvod

Iako je zemljana arhitektura u istočnoj Hrvatskoj bila izuzetno popularna u 19. i 20. stoljeću [1] – [3], danas je većina postojećih zemljanih kuća u derutnome stanju i uglavnom izvan uporabe. Ovo potvrđuju i terenska istraživanja koja su proveli autori. Do danas u Hrvatskoj nije provedeno istraživanje svojstava niti potresnoga ponašanja zemljane arhitekture. Osim toga, ne postoje norme za sanaciju niti izgradnju novih zemljanih konstrukcija. Međutim, valja napomenuti kako tehnike građenja zemljom posljednjih desetak godina postaju sve češći predmet istraživanja diljem Europe [4] – [7], ali i izvan Europe [8] – [11]. Među ostalim tehnikama građenja zemljom ističu se čerpič (engl. *adobe*), nabijena zemlja (reg. *naboj*, engl. *rammed earth*) i zemljani blokovi (engl. *compressed earth blocks*).

Predmet su ovoga istraživanja kuće čiji su nosivi zidovi izrađeni od nabijene zemlje. Terenskim istraživanjima koje su autori proveli u Slavoniji i Baranji primijećen je velik broj upravo takvih kuća. O njima pišu i Lončar-Vicković, Stober [1] i Živković [2], no ne daju pregled fizikalnih, mehaničkih ili toplinskih svojstava niti se osvrću na potresnu otpornost. Tradicionalno se zid od nabijene zemlje gradio nasipavanjem vlažnoga zemljanog materijala između drvene oplata koji se potom zbijao pomoću drvenoga nabijača [1]. Međutim, Bu i sur. [12] navode kako se u novije vrijeme drveni nabijači zamjenjuju pneumatskima. Debljina sloja zemlje smanji se nakon zbijanja uglavnom s otprilike 15 cm na otprilike 10 cm [12]. Takav se proces ponavlja dok se ne dostigne željena visina zida.

Središte ovoga rada jest istraživanje toplinskih svojstava tradicijskih zemljanih mješavina prikupljenih na terenu, zbog čega je pregledan bitan broj postojećih zemljanih kuća i gospodarskih objekata u istočnoj Slavoniji. Provedena su opsežna mjerenja, fotografiranje i prikupljanje uzoraka materijala, sve uz prisutnost i dopuštenje vlasnika objekata. Sakupljeni uzorci materijala ispitani su u laboratorijima na Građevinskome i arhitektonskome fakultetu Osijek. Rezultati prikazani u ovome radu dobiveni su na temelju ispitivanja dviju mješavina prikupljenih iz jedne kuće u Aljmašu.

2. Svojstva tradicijskih zemljanih mješavina

Iz zidova su, gdje je to bilo moguće i uz vlasnikovo dopuštenje, pažljivo izvađeni veći komadi nabijene zemlje koji su potom čuvani u zatvorenim plastičnim vrećicama u laboratorijskim uvjetima. Prikupljeni komadi zidova od nabijene zemlje bili su dovoljno veliki kako bi se iz njih izrezale prizme približnih dimenzija $100 \times 100 \times 37,5$ mm za određivanje koeficijenta toplinske provodljivosti (Slika 1).

Poznato je kako je koeficijent toplinske propusnosti u izravnoj vezi s prostornom gustoćom i udjelom vlažnosti. Stoga su preostali, uglavnom nepravilni veći dijelovi, nabijene zemlje nakon rezanja korišteni za određivanje prostorne gustoće i udjela vlažnosti u prikupljenome materijalu. Udio vlažnosti u materijalu određen je i nakon ispitivanja koeficijenta toplinske provodljivosti. Postupci određivanja spomenutih svojstava opisani su u narednim poglavljima.



Slika 1. Rezanje uzoraka iz velikih komada nabijene zemlje

2.1. Udio vlažnosti u materijalu i prostorna gustoća

Udio vlažnosti u materijalu određen je prema normi BS 1377-2:1990. Slijedeći postupak u navedenoj normi, određena je vlažnost odmah nakon prikupljanja materijala na terenu i nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti. U Tablici 1 w_0 odnosi se na udio vlažnosti određen isti dan kada je materijal prikupljen, tj. po povratku s terena, dok se w_λ odnosi na udio vlažnosti određen nakon ispitivanja koeficijenta toplinske propusnosti λ , nakon čega su prizme razmrvljene kako bi bilo moguće precizno odrediti udio vlažnosti. Pregledom Tablice 1 moguće je uočiti kako dvije mješavine nemaju istu početnu vlažnost, iako su uzorci uzeti iz iste kuće, na isti dan i iako su čuvani u istim uvjetima. Vjerujemo kako su orijentacija konstrukcijskoga elementa (izloženost suncu ili položaj u sjeni), prostorna gustoća (zbijenost) materijala i visina uzorkovanja odgovorni za razliku u udjelu vlažnosti. Materijal mješavine A1 prikupljen je iz zida koji se nalazio u sjeni, dok je materijal mješavine A3 izvađen iz zida na osunčanoj strani kuće. Stoga se može očekivati da je udio vlažnosti mješavine A1 veći. Nadalje, uočeno je smanjenje udjela vlažnosti u prosjeku za oko 12 %. Za mješavinu A2 nije bilo moguće precizno odrediti svojstva promatrana u ovome radu.

Tablica 1. Početna vlažnost i vlažnost nakon određivanja koeficijenta toplinske propusnosti

Mješavina	w_0 (%)	w_λ (%)	Odstupanje, $(w_\lambda - w_0) / w_0$ (%)
A1	3,87	3,37	-12,92
A3	2,90	2,54	-12,41

Preliminarnim istraživanjem uočeno je kako uređaj za određivanje koeficijenta toplinske propusnosti utječe na vlažnost unutar uzorka jer se prilikom ispitivanja gornja i donja strana uzorka nejednoliko hlade, odnosno zagrijavaju. Osim toga, nakon provedenih ispitivanja radi određivanja koeficijenta toplinske propusnosti uočen je vodeni kondenzat uz rub otvora uređaja i na dijelovima gumenih podloga pomoću kojih se uzorak ugrađuje u uređaj. Ovo će biti dodatno istraženo. Nadalje, približno mjesec dana nakon prikupljanja materijala određena je prostorna gustoća (Tablica 2) na manjim uzorcima zemljanoga materijala prema normi BS 1377-2:1990 koja je u prosjeku iznosila $1,60 \text{ g/cm}^3$.

Tablica 2. Prostorna gustoća, ρ

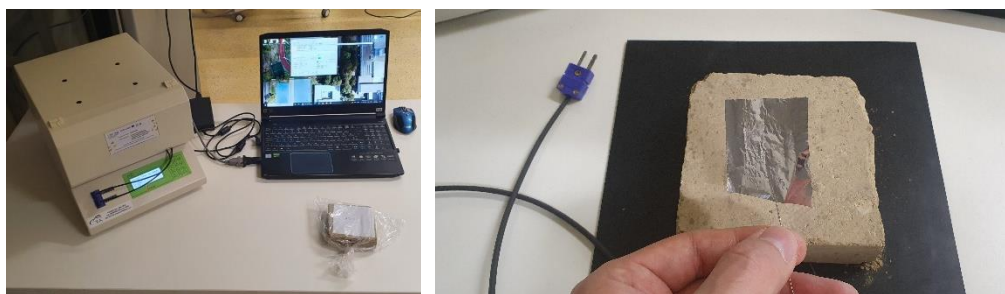
Mješavina	ρ (g/cm ³)
A1	1,50
A3	1,71
Srednja vrijednost	1,60

2.2. Koeficijent toplinske provodljivosti

Toplinska provodljivost λ (W/(mK)) svojstvo je građevnih materijala da provode toplinu, a definira se kao količina topline koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala površine presjeka 1 m² i debljine 1 m okomito na njegovu površinu pri razlici temperature 1 K te se računa pomoću sljedećega izraza (1) [13]:

$$\lambda = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \cdot \frac{d}{t} \quad (1)$$

gdje je Q količina topline, A ploština, ΔT razlika temperature, d debljina materijala, a t vrijeme prolaza topline. Materijali s malom vrijednošću λ zovu se toplinski izolatori, a oni s velikom vrijednošću toplinske provodljivosti nazivaju se vodiči topline. Vrijednost toplinske provodljivosti λ vrlo je promjenjiva, čak i kod istoga materijala [13]. Ovisi o prostornoj gustoći, odnosno poroznosti, kemijskomu sastavu, sadržaju vlage te o temperaturi materijala. Zato govoriti o vrijednosti toplinske provodljivosti nekoga materijala ima smisla samo ako se preciziraju svi navedeni čimbenici [13]. Projektne vrijednosti toplinske provodljivosti nekih građevnih materijala moguće je pronaći u *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* [14], gdje je za različite materijale, ovisno o njihovoj prostornoj gustoći, definirana ova vrijednost. Za određivanje toplinske provodljivosti nabijene zemlje izrađene su prizme tlocrtnih dimenzija 100 x 100 mm, pri čemu je srednja debljina 37,5 mm (Slika 2).



Slika 2. Uređaj (lijevo) i uzorak (desno) za ispitivanje koeficijenta toplinske provodljivosti

Prizme su ispitane u uređaju FOX 200 pomoću kojega se u tri ciklusa postižu različite temperature na gornjoj i donjoj plohi uzorka, pri čemu je razlika temperatura na gornjoj i donjoj plohi prizme stalna u sva tri ciklusa i iznosi 10 °C. Određeni koeficijenti toplinske provodljivosti za svaki ispitani uzorak λ_i prikazani su u Tablici 3. Rezultati se smatraju prihvatljivima jer najveće odstupanje među koeficijentima za istu mješavinu ne prelazi 10 %. Za potrebe definiranja svojstava materijala za praktične potrebe usvaja se najmanja vrijednost λ_{\min} određena za jednu mješavinu. Osim toga, određena je i srednja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti λ_m .

Tablica 3. Toplinska provodljivost određena na uzorcima nabijene zemlje

Mješavina	Uzorak	λ_i	λ_m	λ_{min}
		(W/(mK))		
A1	1	0,5211	0,5032	0,4896
	2	0,5084		
	3	0,4937		
	4	0,4896		
A3	1	0,7083	0,6736	0,6520
	2	0,6606		
	3	0,6520		

3. Zaključak

Za dvije tradicijske mješavine prikupljene iz kuće u Aljmašu određen je udio vlažnosti odmah po prikupljanju materijala te nakon ispitivanja koeficijenta toplinske provodljivosti. Svi su uzorci prije provođenja ispitivanja čuvani u zatvorenim plastičnim vrećicama u laboratoriju. Ispitivanje koeficijenta toplinske provodljivosti provedeno je otprilike mjesec dana nakon prikupljanja materijala na terenu. Udio vlažnosti u materijalu na terenu u prosjeku je iznosio 3,4 %. Nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti uočeno je smanjenje udjela vlažnosti za oko 12 %. Koeficijent toplinske provodljivosti određen je na prizmama tlocrtnih dimenzija 100 x 100 mm i prosječne debljine 37,5 mm te ima vrijednost između 0,49 i 0,65 W/(mK). Prostorna gustoća ispitanih uzoraka iznosila je u prosjeku 1,60 g/cm³. Daljnja istraživanja svojstava nabijene zemlje s područja Republike Hrvatske nužna su kako bi se omogućio razvoj normi i tehničkih propisa za projektiranje novih i sanaciju postojećih zemljanih konstrukcija, čime bi se spriječilo njihovo postupno propadanje i nestajanje.

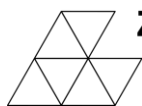
Zahvale

Ovaj je rad sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-7363, pod nazivom *Nabijena zemlja za modeliranje i normizaciju u potresno aktivnim područjima*, na čemu im zahvaljujemo. Mjerenja koeficijenta toplinske provodljivosti izvršena su u uređaju FOX 200, nabavljenomu u okviru projekta *Ozelenjavanje gradova – razvoj i promoviranje energetske učinkovitosti i održive urbane životne sredine u pograničnim gradovima između Hrvatske i Srbije*, HR-RS290, IPA Interreg. Zahvaljujemo vlasnicima kuće u Aljmašu koji su dopustili prikupljanje uzoraka za potrebe ispitivanja i laborantu Daliboru Ercegu na pomoći oko pripreme uzoraka za ispitivanje.

Literatura

- [1] Lončar-Vicković S., Stober D.: Tradicijska kuća Slavonije i Baranje, Ministarstvo turizma Republike Hrvatske, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, str. (1-116), 2011.
- [2] Živković Z., Hrvatsko tradicijsko graditeljstvo, Ministarstvo kulture, Uprava za zaštitu kulturne baštine, 2013.
- [3] Perić A, Potresno ponašanje zidova tradicijskih kuća od nabijene zemlje, Josip Juraj Strossmayer Osijek, 2020.

- [4] Gomes M. I., Gonçalves D., Faria P., Ustabilized rammed earth: Characterization of material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements, *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 8, no., pp. 185-212, 2014., DOI: 10.1080/15583058.2012.683133
- [5] Bui Q. B., Bui T. T., Limam A., Morel J. C., Discrete element modeling of rammed earth wall, *Rammed Earth Construction – Proceedings of the 1st International Conference on Rammed Earth Construction, ICREC 2015*, pp. 57-61, 2015.,
- [6] Serrano S., Rincón L., González B., Navarro A., Bosch M., Cabeza L. F., Rammed earth walls in Mediterranean climate: Material characterization and thermal behaviour, *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 281-288, 2017., DOI: 10.1093/ijlct/ctw022
- [7] Jaquin P. A., Augarde C. E., Gallipoli D., Toll D. G., The strength of unstabilised rammed earth materials, *Geotechnique*, vol. 59, no. 5, pp. 487-490, 2009., DOI: 10.1680/geot.2007.00129
- [8] Ciancio D., Gibbings J., Experimental investigation on the compressive strength of core and molded cement-stabilized rammed earth samples, *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 294-304, 2012., DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.070
- [9] Ciancio D., Beckett C. T. S., Carraro J. A. H., Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth, *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 59-65, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.077
- [10] Shrestha K. C., Aoki T., Miyamoto M., Wangmo P., Pema, In-plane shear resistance between the rammed earth blocks with simple interventions: Experimentation and finite element study, *Buildings*, vol. 10, no. 3, 2020., DOI: 10.3390/buildings10030057
- [11] Lin H., Zheng S., Lourenço S. D. N., Jaquin P., Characterization of coarse soils derived from igneous rocks for rammed earth, *Eng. Geol.*, vol. 228, pp. 137-145, 2017., DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.003
- [12] Bui Q. B., Morel J. C., Hans S., Meunier N., Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: The case of rammed earth, *Mater. Struct. Constr.*, vol. 42, no. 8, pp. 1101-1116, 2009., DOI: 10.1617/s11527-008-9446-y
- [13] Galović A., *Termodinamika II*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2003.
- [14] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Translation: Technical Regulation on the Rational Use of Energy and Thermal Insulation in Buildings). *Narodne novine*, broj 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.15>

TEORIJSKA ANALIZA SAVIJANJA BETONSKIH GREDA S OVIJENIM TLAČNIM PODRUČJEM

THEORETICAL ANALYSIS OF BENDING OF CONCRETE BEAMS WITH CONFINED COMPRESSION AREA

Tvrtko Renić¹, Tomislav Kišiček¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, tvrtko.renic@grad.unizg.hr; tomislav.kisicek@grad.unizg.hr

Sažetak

Betonske grede koje su armirane velikom količinom vlačne čelične armature ili FRP armaturom imaju malu duktilnost pri savijanju koja se može povećati ovijanjem tlačnoga područja. U radu su teorijski objašnjeni razlozi povećanja duktilnosti kao i analitički postupak određivanja dijagrama momenta savijanja – zakrivljenost za betonske grede s ovijenim tlačnim područjem. Na temelju toga dijagrama moguće je odrediti duktilnost presjeka, a integracijom duž grede i duktilnost elementa. Time je dan postupak kojim se može kvantificirati ponašanje betonskih greda pri savijanju što olakšava postupak procjene i projektiranja konstrukcija. Pri konstruiranju dijagrama definirane su karakteristične točke za koje su, uz poštivanje ravnoteže sila i momenata, Bernoullijeve hipoteze ravnih presjeka te kompatibilnosti deformacija, definirani momenti savijanja i zakrivljenosti. Pokazano je kako se duktilnost betonskih greda može bitno povećati ovijanjem tlačnoga područja što trenutačne norme za projektiranje ne prepoznaju. Potrebno je provesti dodatna teorijska i eksperimentalna istraživanja kako bi se takve grede mogle koristiti u praksi.

Ključne riječi: ovijeno tlačno područje, teorijsko istraživanje, duktilnost

Abstract

Concrete beams reinforced with a large amount of tension steel reinforcement or with FRP reinforcement have low ductility which can be increased by confining the compression area. In this paper a theoretical explanation of ductility increase is given and procedure for defining bending moment – curvature diagrams for beams with confined compression area is described. Based on that diagram ductility of a section is easily determined, and by integration along the beam it is also possible to determine ductility of the element. This procedure enables the quantitative assessment of beam behaviour which simplifies the design process. Bending moments and curvatures of diagram are determined by considering force equilibrium, straight sections remaining straight and deformation compatibility. Confining the compression area can significantly increase the ductility of a section which is not acknowledged in current design standards. Additional research is needed to enable the use of such beams in practice.

Keywords: confined compression area, theoretical analysis, ductility

1. Uvod

Duktilnost betonskih elemenata jedno je od najvažnijih svojstava u seizmički aktivnim područjima [1]. Kako bi se osigurala duktilnost betonskih greda, potrebno je osigurati pravilan oblik sloma i pravilno detaljiranje. Za duktilne betonske konstrukcije pravilnim oblikom sloma smatra se savojni oblik, dok su ostali oblici sloma (posmik, proklizavanje armature, izvijanje armature...) neduktilni. Prema hrvatskoj normi za projektiranje konstrukcija u potresnim područjima HRN EN 1998-1 [2] ovaj se princip naziva projektiranje po sposobnosti nosivosti (engl. *capacity design*), a primjenjuje se na sve betonske elemente. Također se zahtijevaju posebna pravila detaljiranja. U stupovima je potrebno oviti kritična područja blizu čvorova, u zidovima se ovijaju rubni dijelovi prizemlja, a u gredama okvira umjesto ovijanja ograničava se omjer vlačne i tlačne armature. Kada je riječ o veznim gredama između dvaju zidova, zahtijevaju se dijagonalni armaturni koševi.

Duktilnost se može izraziti na više načina, a u ovome će se radu razmatrati duktilnost presjeka koja je omjer zakrivljenosti pri slomu i zakrivljenosti pri popuštanju vlačne armature. Velika količina čelične vlačne armature kod greda smanjuje duktilnost jer se povećava moment savijanja pri kojem dolazi do popuštanja armature, a krajnji se moment ne mijenja jer se slom događa u tlačnome području. Povećanje duktilnosti može se ostvariti dodavanjem tlačne armature koja preuzima dio tlačne sile ili ovijanjem tlačnoga područja. Za grede armirane velikom količinom čelične vlačne armature postoji niz ispitivanja [3 – 8] te se pokazalo kako se ovijanjem tlačnoga područja bitno povećava duktilnost takvih greda.

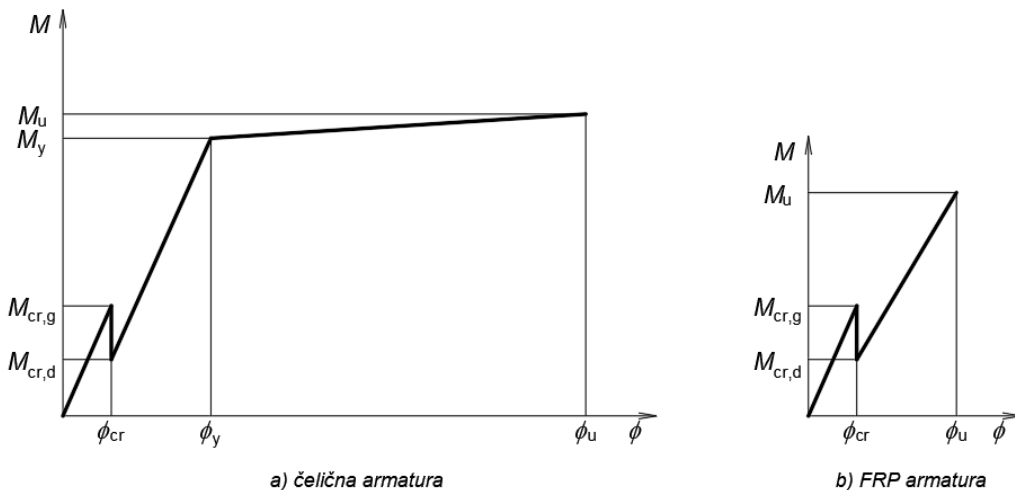
Grede armirane FRP vlačnom armaturom ispitivane su u radu [9] te se pokazalo kako je njihov slom neduktilan. Prema smjernicama za projektiranje betonskih konstrukcija armiranih FRP armaturom [10] predlaže se postaviti veliku količinu vlačne armature kako bi se osigurao savojni slom gnječanjem armature jer se tako postiže malo veća duktilnost. Dodavanje tlačne FRP armature moguće je, ali je poznato kako se FRP armatura ponaša bitno lošije u tlaku nego u vlaku [11]. Nedostaje eksperimentalnih i teorijskih ispitivanja greda armiranih vlačnom FRP armaturom s ovijenim tlačnim područjem. S obzirom na prednosti FRP-a u odnosu na čelik i činjenice kako je glavni nedostatak FRP-a loša duktilnost, očekuje se kako bi se ovijanjem tlačnoga područja FRP-om armiranih greda moglo postići povoljno ponašanje.

U nastavku rada prikazana je teorijska podloga određivanja dijagrama momenta savijanja – zakrivljenost za grede s ovijenim tlačnim područjem jer se pomoću toga dijagrama može jednostavno procijeniti duktilnost presjeka, a integriranjem duž grede (uz poštivanje rubnih uvjeta) i duktilnost elementa. Određivanje dijagrama za standardno čelikom armirane betonske grede (bez ovijanja tlačnoga područja) poznato je i detaljnije opisano u radovima [12,13]. U ovome će se radu detaljnije objasniti specifičnosti dijagrama kada je tlačno područje ovijeno.

2. Teorijski model

Standardni čelikom armirani betonski elementi koji otkazuju savijanjem imaju tri karakteristična područja ponašanja: prije raspucavanja betona, između raspucavanja betona i popuštanja armature i između popuštanja i sloma. Standardni FRP-om armirani betonski elementi koji otkazuju savijanjem imaju dva karakteristična područja ponašanja: prije raspucavanja betona te između raspucavanja betona i sloma.

Navedena su područja vidljiva za čelikom armiranu gredu na Slici 1 a), a za FRP-om armiranu gredu na Slici 1 b).



Slika 1. Dijagrami momenta savijanja i zakrivljenosti za standardno armirane presjeka

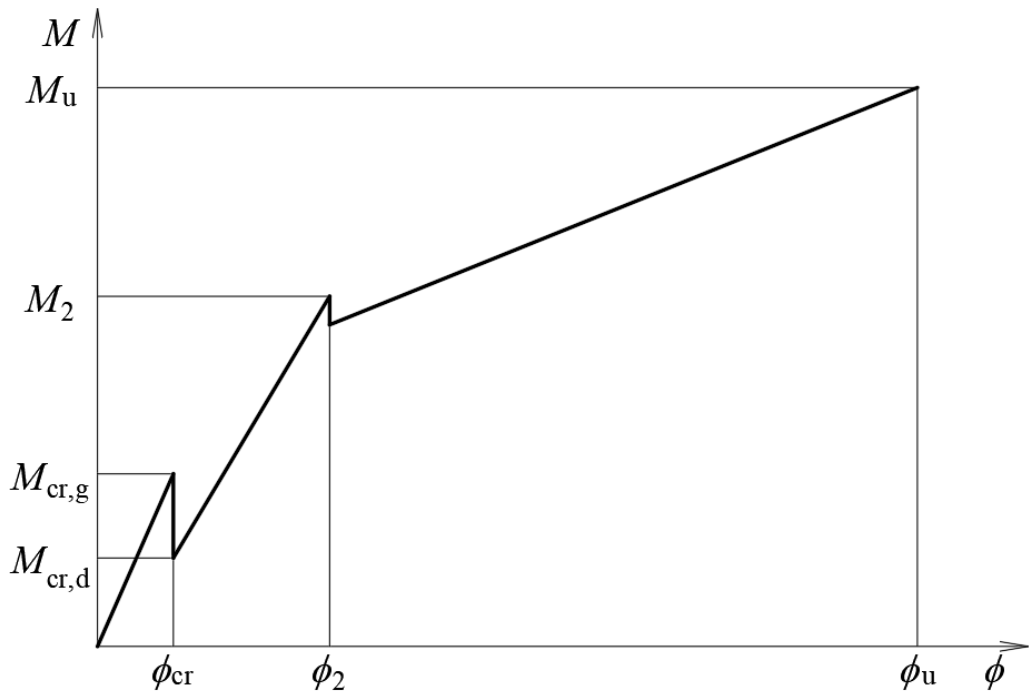
Na slici su korištene sljedeće oznake:

$M_{cr,g}$	moment savijanja neposredno prije raspucavanja
$M_{cr,d}$	moment savijanja neposredno poslije raspucavanja
M_y	moment savijanja pri popuštanju čelične armature
M_u	moment pri slomu presjeka
ϕ_{cr}	zakrivljenost presjeka pri raspucavanju
ϕ_y	zakrivljenost presjeka pri popuštanju
ϕ_u	zakrivljenost presjeka pri slomu presjeka.

Duktilnost se preko zakrivljenosti može izraziti kao $\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$. Na Slici 1 vidljivo je kako standardna FRP-om armirana gredu nema duktilnost, tj. $\mu_\phi = 1$. U slučaju ovijanja tlačnoga područja relativna deformacija pri slomu betona povećava se kao i čvrstoća betona [14]. Zbog ovijanja se može definirati još jedna karakteristična točka ponašanja presjeka, početak gnječenja betona u tlačnome području. Kada se kod neovijenih presjeka najnapretnutije vlakance počne gnječiti, presjek se smanjuje, a time i nosivost progresivno i nekontrolirano pada.

Ovijanjem presjeka gnječenje betona uzrokuje sličan pad do trenutka kada se odlomi čitav zaštitni sloj betona. Kada se to dogodi, beton unutar spona postaje najnapretnutiji dio presjeka. S obzirom na to da ovijeni beton ima veću čvrstoću i relativnu deformaciju pri slomu, moguće je za taj niži presjek ostvariti jednaku ili čak i veću nosivost pri aktivaciji spona. Na Slici 2 prikazan je dijagram momenta savijanja – zakrivljenost presjeka armiranog FRP-om u vlaklu i s ovijenim tlačnim područjem. Na Slici 2 također je vidljiva nova točka (točka 2) s pripadnim momentom savijanja i zakrivljenosti. Zadnja grana dijagrama može rasti, padati ili biti konstantna, ovisno o detaljima armiranja elementa. Vidljivo je kako je ostvareno povećanje duktilnosti koje se za ovakve elemente može izraziti kao $\mu_\phi = \phi_u / \phi_2$. Krajnja ostvariva duktilnost ovisi o učinkovitosti ovijanja, tj. o poprečnome i uzdužnome razmaku spona te o materijalu spona. Odnos pritiska ovijanja i detalja armiranja propisan je u hrvatskoj normi za projektiranje betonskih konstrukcija HRN EN 1992-1-1 [15].

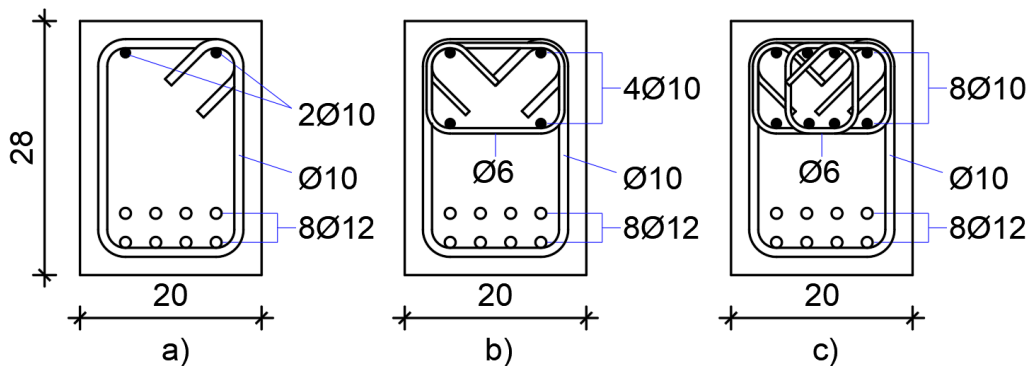
Napravljen je analitički model koji razmatra ponašanje FRP-om armiranih greda s ovijenim tlačnim područjem. Sve karakteristične točke dijagrama momenta savijanja – zakrivljenost određene su u skladu s ranijim razmatranjima, a postupak je detaljnije objašnjen u [12].



Slika 2. Dijagrami momenta savijanja i zakrivljenosti za ovijene presjeke

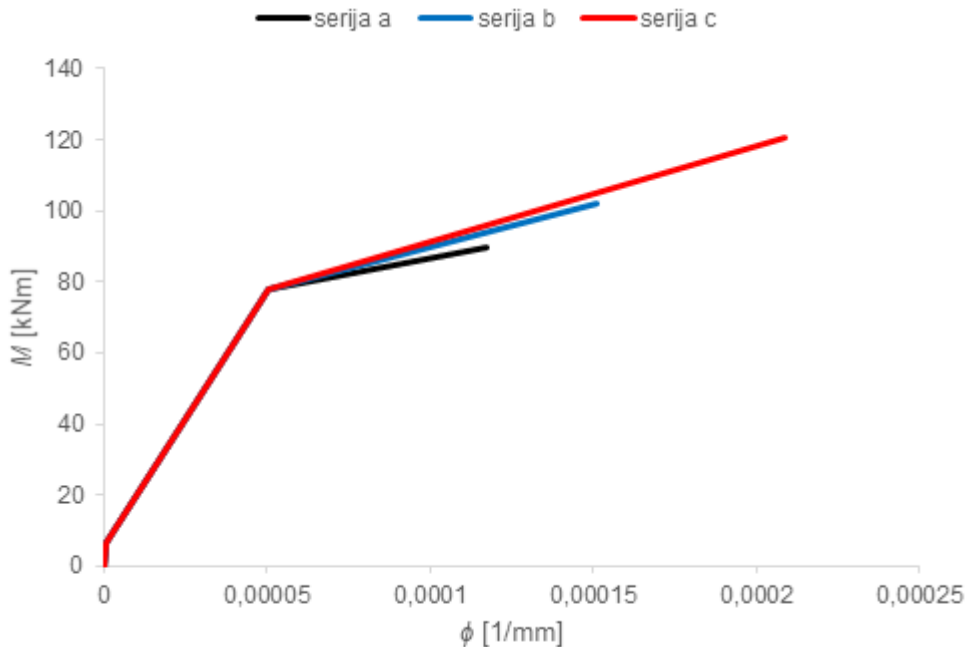
2.1. Utjecaj pritiska ovijanja na duktilnost presjeka

Na Slici 3 prikazani su presjeci koji su razmotreni u provedenoj analizi. Bijelom bojom označene su FRP šipke, a crno su sjenčane čelične šipke. Vlačna armatura odabrana je kako bi se osigurala za sve presjeke sloma preko betona.



Slika 3. Presjeci razmotreni u analizi

U analizi je pretpostavljen beton razreda C25/30, čelična armatura B500B i FRP čvrstoće 1000 N/mm^2 te modula elastičnosti 50000 N/mm^2 , što odgovara staklenim vlaknima. Na Slici 4 prikazan je dijagram momenta savijanja – zakrivljenost za sva tri presjeka prikazana na Slici 3. Na Slici 4 nazivom „serija a“ označen je presjek sa Slike 3 a), nazivom „serija b“ označen je presjek sa Slike 3 b) te nazivom „serija c“ presjek sa Slike 3 c). Nije razmotren presjek bez spona jer se smatra kako će u stvarnim gredama postojati određena količina spona za preuzimanje posmika.



Slika 4. Dijagrami momenta savijanja – zakrivljenost za pojedinu seriju

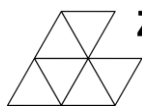
Na Slici 4 vidljivo je kako sve serije imaju jednako ponašanje do druge karakteristične točke, tj. početka gnječenja betona. „Serija a“ ima najmanju duktilnost, a „serija c“ najveću, što je i očekivano s obzirom na to da „serija c“ ima najviše spona za ovijanje. „Serija c“ ima 78 % veću duktilnost nego „serija a“.

3. Zaključak

FRP-om armirani elementi imaju vrlo malu duktilnost ako im se ne ovije tlačno područje. Teorijskom analizom pokazalo se kako se ovijanjem tlačnoga područja može bitno povećati duktilnost FRP-om armiranih greda. Duktilnost je posljedica gnječenja betona u tlaku pa je važno osigurati upravo taj oblik sloma, a sve ostale izbjeći. Ovom analizom moguće je predvidjeti učinak ovijanja na duktilnost što može služiti kao podloga za planiranje eksperimentalnoga istraživanja.

Literatura

- [1] Paulay T., Priestley, M. J. N.: Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, 1. izdanje, John Wiley & Sons Inc., 1992.
- [2] HRN EN 1998-1 Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, 2011.
- [3] Alasadi, S., Ibrahim, Z., Shafigh, P., Javanmardi, A.: An Experimental and Numerical Study on the Flexural Performance of Over-Reinforced Concrete Beam Strengthening with Bolted-Compression Steel Plates: Part II, Appl. Sci. Vol. 10, 2020, (1-21), doi: 10.3390/app10010094.
- [4] Aylie, H., Antonius, Okiyarta, A.W. : Experimental study of steel-fiber reinforced concrete beams with confinement, Procedia Eng. Vol. 125, 2015, (1030–1035), doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.158.
- [5] Radnić, J., Harapin, A., Markić, R.: Ispitivanja utjecaja spona na nosivost betonskih greda pri tlačnom slomu, Građevinar, Vol. 59, 2007, (789–795)
- [6] Jang, I.-Y., Park, H.-G., Kim, Y.-G., Kim, S.-S., Kim, J.-H.: Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams Confined with Stirrups in Pure Bending Zone, Int. J. Concr. Struct. Mater., Vol. 3, 2009, (39–45).
- [7] Øverli, J.A., Jensen, T.M.: Increasing ductility in heavily reinforced LWAC structures, Eng. Struct., Vol. 62–63, 2014, (11–22), doi: 10.1016/j.engstruct.2014.01.017.
- [8] Priastiw, Y.A., Imran, I., Nuroji: The Effect of Different Shapes of Confinement in Compression Zone on Beam's Ductility Subjected to Monotonic Loading, Procedia Eng., Vol. 125, 2015, (918–924), doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.098.
- [9] Kišiček, T.: Progibi betonskih greda s FRP armaturom, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2006.
- [10] *fib* bulletin 40 - FRP reinforcement in RC structures, 2007.
- [11] Bai, Y., Keller, T.: Shear Failure of Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Composites under Axial Compression, J. Compos. Constr., Vol. 13, 2009, (234–242), doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000003.
- [12] Kišiček, T., Sorić, Z.: Dijagram moment savijanja – zakrivljenost za armiranobetonske gredne elemente, Građevinar, Vol. 55, 2003, (207–215).
- [13] Kišiček, T., Renić, T., Lazarević, D., Hafner, I.: Compressive Shear Strength of Reinforced Concrete Walls at High Ductility Levels, Sustainability, Vol. 12, 2020, (1–16), doi: 10.3390/su12114434.
- [14] Mander, J.B.; Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, J. Struct. Eng., Vol. 114, 1988, (1804–1826), doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- [15] HRN EN 1992-1-1:2013, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade, 2013.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.16>

PREGLED ZIDANIH SVOĐENIH MOSTOVA U REPUBLICI HRVATSKOJ

A REVIEW OF EXISTING MASONRY ARCH BRIDGES IN CROATIA

**Domagoj Trajber¹, Davorin Penava¹, Fulvio Rinaudo² Vasilis Sarhosis³
Lars Abrahamczyk⁴**

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, dtrajber@gfos.hr; dpenava@gfos.hr

(2) Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli, 39, 10125 Torino, Italy, fulvio.rinaudo@polito.it

(3) School of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK, v.sarhosis@leeds.ac.uk

(4) Chair of Advanced Structures, Faculty of Civil Engineering, Bauhaus-Universität Weimar, Marienstraße 13D, 99423 Weimar, Germany, lars.abrahamczyk@uni-weimar.de

Sažetak

U radu je dan pregled zidanih svođenih mostova u Republici Hrvatskoj, njihovih tipoloških obilježja i opaženih oštećenja. Podatci o mostovima prikupljeni su u ovlaštenim ustanovama, državnim arhivima i restauratorskim zavodima. Podatci su statistički obrađeni uzimajući u obzir gradivo, geometrijska svojstva, debljinu svoda (luka), broj raspona i otvorenost/zatvorenost bočnih zidova. Najčešći su kameni mostovi konstantne debljine svoda (luka) i zatvorenih bočnih zidova s kružnim lukom za jednorasponske i segmentnim lukom za višerasponske mostove. Brzim vizualnim *in-situ* pregledima prikupljeni su dodatni podatci o geometrijskim svojstvima i stanju cestovnih mostova od opeke. Uočena oštećenja upućuju na potrebu za detaljnijom provjerom radi ocjenjivanja stanja mosta te kako bi se prikladnim mjerama održavanja i popravaka očuvala njihova trajnost i nastavilo neometano korištenje.

Ključne riječi: zidani svođeni mostovi, gradivo, tipologija, geometrija, oštećenja

Abstract

This study offers a review of masonry arch bridges in Croatia, it presents their most common typologies, geometric characteristics, and damages. Data about bridges have been collected from official institutions, state archives, and conservation institutes. Statistical analysis taking into account materials, arch geometry, arch thickness, number of spans, and superstructure type was conducted using collected data. The most common typologies are stone bridges with constant arch thickness, closed spandrel walls, and circular arch for the single-span and segmental arch for multi-span bridges. Additional data about geometry and damage of road brickwork bridges has been obtained with a rapid visual *in-situ* inspection. Observed damages indicate the need for further investigation for purpose of better understanding the capacity of these bridges, to secure their safe use through adequate maintenance and retrofitting.

Keywords: masonry arch bridges, construction material, typology, geometry, damage

1. Uvod

Na željezničkim i cestovnim mrežama u Europi postoji približno 300 000 zidanih svođenih mostova [1]. Izvori poput [2] – [4] pružaju više podataka o zidanim svođenim mostovima u drugim europskim zemljama. Glavnina ovih mostova sagrađena je prije više od stotinu godina te su tijekom uporabnoga vijeka bili izloženi utjecajima iz okoliša, prirodnim nepogodama te stalnom porastu prometnoga opterećenja. Ti su utjecaji uzrokovali različita oštećenja koja utječu na njihovu nosivost i uporabljivost. Zbog toga je bitno imati pouzdanu metodu ocjenjivanja mostova. Pregled eksperimentalnih istraživanja i metoda ocjenjivanja mostova moguće je naći u [5].

Statističkom obradom podataka o zidanim svođenim mostovima u Republici Hrvatskoj, koji su dobiveni u sljedećim ovlaštenim ustanovama: Hrvatske željeznice, Hrvatske ceste i Županijske uprave za ceste, državni arhivi i restauratorski zavodi, utvrđeno je kako postoji približno 178 zidanih svođenih mostova. Ovi mostovi čine važan dio prometne mreže, od kojih se na cestama nalazi 85 %, a na željeznicama 15 % mostova. Većina ovih mostova građena je tijekom 19. i 20. stoljeća od lokalno dostupnih materijala. U obalnim i planinskim područjima za izgradnju mostova korišten je kamen, dok je u kontinentalnome području korištena opeka. Dva najstarija (cestovna) mosta (Slika 1) koja su u uporabi i danas sagrađena su početkom 18. stoljeća.

Brzim vizualnim *in-situ* pregledima prikupljeni su detaljniji podatci o geometriji i oštećenjima mostova od opeke na temelju kojih je uočena potreba za detaljnijom provjerom radi ocjenjivanja stanja ovih mostova te kako bi se prikladnim mjerama održavanja i popravaka očuvala njihova trajnost i nastavilo neometano korištenje.



a) Stari most Valpovo (Karašice)



b) Most na Dobri, Novigrad (Dobra) (Slika preuzeta s *Googlea*)

Slika 1. Stari most Valpovo (a) i Most na Dobri (b)

2. Tipološka obilježja

Na temelju tipoloških obilježja zidani svođeni mostovi klasificirani su u skladu s [4], ali prilagodbom kojom su uvršteni segmentni, a isključeni nepravilni svodovi (koji nisu bili zastupljeni). Promatrana tipološka obilježja bila su: gradivo, geometrijska svojstva svoda (luka), debljina luka, broj raspona i izvedba bočnih zidova (vidjeti Tablicu 1).

Tablica 1. Klasifikacija zidanih svođenih mostova prema tipološkim obilježjima

Gradivo	→	Opeka	Debljina luka	→	Konstantna
		Kamen			Promjenjiva
		Mješavina			
Geometrija svoda (luka)	→	Polukrug	Broj raspona	→	Jednorasponski
		Parabola			Višerasponski
		Elipsa	Konstrukcija bočnih zidova	→	Zatvorena
		Segment			Otvorena
		Zakošeni			

Obradom prikupljenih podataka utvrđeno je sljedeće:

1. 86 % mostova izvedeno je od kamena, 13 % od opeke, a preostalih 1 % od kamena i opeke
2. najzastupljeniji su segmentni (28 %) i polukružni luk (25 %)
3. 69 % mostova ima konstantnu debljinu luka
4. približno je 66 % mostova jednorasponskih, dok je preostalih 33 % višerasponskih
5. najčešći su kameni mostovi konstantne debljine luka (15 %) i zatvorenih bočnih zidova s kružnim lukom za jednorasponske i segmentnim lukom za višerasponske mostove (15 %).

3. Geometrijska obilježja

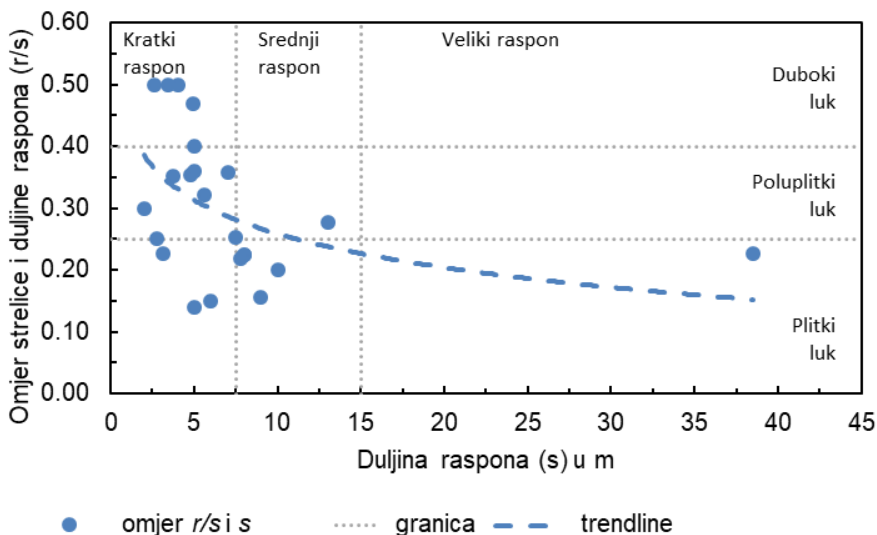
Radi usporedbe zidanih svođenih mostova prema geometrijskim obilježjima prikupljani su podatci o broju i svijetloj duljini raspona s , strelici r , obliku i debljini svoda (luka) u tjemenu d_c i peti d_s . Mostovi su zatim klasificirani u šest grupa prema [6], od kojih su tri na temelju omjera strelice i duljine raspona, a tri prema duljini raspona. Grupe prema omjeru strelice i raspona su:

- plitki lukovi $0,00 < r/s \leq 0,25$
- poluplitki lukovi $0,25 < r/s \leq 0,40$
- duboki lukovi $0,40 < r/s$

a grupe prema duljini raspona su:

- kratki raspon $0,0 < s \leq 7,5$
- srednji raspon $7,5 < s \leq 15,0$
- veliki raspon $15,0 < s$.

Na Slici 2 prikazan je odnos između omjera strelice i duljine raspona (r/s) i duljine raspona (s), te su označena područja odabranih grupa mostova. Zastupljenost mostova prema odabranim grupama prikazana je u Tablici 2.



Slika 2. Odnos između omjera strelice i duljine raspona (r/s) i duljine raspona (s)

Tablica 2. Raspodjela mostova po grupama na temelju omjera strelice i duljine raspona (r/s) i duljine raspona (s)

	Kratki raspon	Srednji raspon	Veliki raspon	Σ
Duboki luk	4 (18 %)	-	-	4 (18 %)
Poluplitki luk	7 (30 %)	1 (4 %)	-	8 (34 %)
Plitki luk	4 (18 %)	6 (26 %)	1 (4 %)	11 (48 %)
Σ	15 (66 %)	7 (30 %)	1 (4 %)	

Na temelju geometrijskih obilježja odabrana su tri referentna zidana svoda cestovnih mostova od opeke. Pri tome nisu razmatrani mostovi velikoga raspona i mostovi s dubokim svodom (lukom) zbog njihove male zastupljenosti. U Tablici 3 prikazana su geometrijska obilježja referentnih zidanih svodova.

Tablica 3. Geometrijska obilježja referentnih zidanih svodova

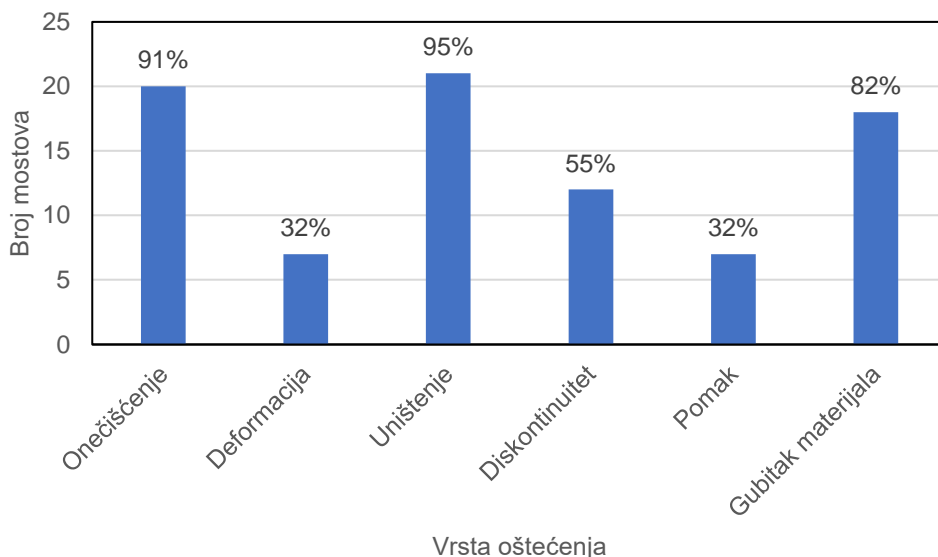
	Poluplitki svod (luk)	Plitki svod (luk)
Kratki raspon	$s = 4,70$ m	$s = 4,20$ m
	$r/s = 0,35$	$r/s = 0,20$
	$d_c = 0,60$ m	$d_c = 0,60$ m
	(Most A)	(Most B)
Srednji raspon	-	$s = 8,40$ m
	-	$r/s = 0,20$
	-	$d_c = 0,80$ m
		(Most C)

4. Oštećenja i *in-situ* pregled mostova

Tijekom uporabnoga vijeka zidani svođeni mostovi pretrpe oštećenja koja utječu na njihovu nosivost i uporabljivost. Najčešće su uzrokovana propadanjem gradiva kao posljedica izloženosti okolišu, starosti i nepravovremenoga održavanja. U skladu s [7] oštećenja su klasificirana u šest glavnih vrsta:

- **onečišćenje** – pojava bilo kakve vrste raslinja ili nečistoća
- **deformacija** – promjene u geometrijskim svojstvima (izvijanje ili ugibanje ispune, ziđa, zaštite, te klizanje i bubrenje ziđa)
- **uništenje** – propadanje fizikalnih i kemijskih konstrukcijskih značajki (takva se oštećenja mogu prepoznati po, primjerice, ljuštenju ili odlamanju opeke)
- **diskontinuitet** – pukotine
- **pomaci** – pomaci cijele konstrukcije ili njezinih konstrukcijskih dijelova (primjerice rotacija ili translacija bočnih zidova)
- **gubitak gradiva**.

In-situ vizualni pregled i klasifikacija prema oštećenjima provedeni su na 22 zidana svođena cestovna mosta od opeke (vidjeti Sliku 3). Najučestalije vrste oštećenja jesu onečišćenje, uništenje i gubitak materijala. Izbijanje soli i mahovina najčešći su oblici onečišćenja, a u nekim su slučajevima zabilježeni probijanje vode i gusto raslinje. Također, u nekoliko slučajeva zabilježeni su bitni diskontinuiteti, poput odvajanja prstenja i potencijalnoga odvajanja bočnih zidova od svoda (luka). Ovakve vrste oštećenja uzrokuju bitan gubitak nosivosti te ih je potrebno sanirati kako bi se nastavila sigurna uporaba mosta.



Slika 3. Učestalost vrsta oštećenja na zidanim svođenim cestovnim mostovima na temelju *in-situ* vizualnoga pregleda

5. Zaključak

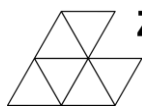
U radu je dan pregled zidanih svođenih mostova u Republici Hrvatskoj, njihovih tipoloških obilježja i oštećenja. Podatci o mostovima prikupljeni su u ovlaštenim ustanovama, državnim arhivima, restauratorskim zavodima i *in-situ* vizualnim pregledom. Provedena je klasifikacija mostova prema tipološkim obilježjima na temelju čega su izdvojene najzastupljenije tipološke značajke. Daljnjom klasifikacijom na temelju geometrijskih obilježja odabrana su tri referentna zidana svoda cestovnih mostova od opeke radi provedbe daljnjih istraživanja. Oštećenja uočena *in-situ* vizualnim pregledom mostova upućuju na potrebu za detaljnijom provjerom radi ocjenjivanja stanja mostova te kako bi se prikladnim mjerama održavanja i popravaka očuvala njihova trajnost i nastavila neometana uporaba. Broj zidanih svođenih mostova u Republici Hrvatskoj skroman je u odnosu na druge europske zemlje, no oni su ipak neizostavan dio prometne mreže te dio građevinske baštine.

Literatura

- [1] A. Brencich and R. Morbiducci, "Masonry Arches: Historical Rules and Modern Mechanics," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 1, no. 2, pp. 165–189, May 2007, doi: 10.1080/15583050701312926.
- [2] S. De Santis and G. de Felice, "Overview of railway masonry bridges with a safety factor estimate," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 8, no. 3, pp. 452–474, May 2014, doi: 10.1080/15583058.2013.826298.
- [3] J. Page, *Masonry arch bridges. State of the art review*. The Stationery Office, 1993.
- [4] J. Bień and T. Kamiński, "Masonry arch bridges in Poland," in *ARCH'04 - Proceedings of the 4th International Conference on Arch Bridges*, 2004, p. 10, [Online]. Available: <http://arch-bridges.fzu.edu.cn/html/Conference/2015/07/13/cdb34f28-0084-4749-8007-3550ef61cc90.html>.
- [5] V. Sarhosis, S. De Santis, and G. De Felice, "A review of experimental investigations and assessment methods for masonry arch bridges.pdf," *Struct. Infrastruct. Eng.*, p. 50, 2016, doi: 10.1080/15732479.2015.1136655.
- [6] D. V. Oliveira, P. B. Lourenço, and C. Lemos, "Geometric issues and ultimate load capacity of masonry arch bridges from the northwest Iberian Peninsula," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 12, pp. 3955–3965, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.09.006.
- [7] J. Bień and T. Kamiński, "Bien and Kaminski (2007) - Damages to masonry arch bridges - proposal for terminology unification," in *ARCH'07 - Proceedings of the 5th International Conference on Arch Bridges*, 2007, pp. 341–348.

Zahvale

Istraživanje je provedeno uz potporu i u okviru projekta *Erasmus+* programa Europske unije pod nazivom *Environmental Risk Assessment and Mitigation on Cultural Heritage Assets in Central Asia – ERAMCA* (projektni broj: 609574-EPP-1-2019-1-IT-EPPKA2-CBHE-JP) i programa Hrvatske zaklade za znanost (HrZZ) pod nazivom *Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti*. Posebna zahvala Hrvatskim željeznicama, Hrvatskim cestama, Županijskim upravama za ceste i Hrvatskome državnom arhivu za ustupanje podataka koji su bitno pridonijeli ovom istraživanju.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.17>

SINERGIJA CRVENOGA MULJA, LETEĆEGA PEPELA I VAPNENCA U CEMENTNIM VEZIVIMA

SYNERGY OF RED MUD, FLY ASH AND LIMESTONE IN CEMENTITIOUS BINDERS

Ivana Vladić Kancir¹, Marijana Serdar²

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, ivana.vladic.kancir@grad.unizg.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, marijana.serdar@grad.hr

Sažetak

Ideja ovoga istraživanja bila je istražiti moguću sinergiju između lokalno dostupnoga crvenoga mulja, letećega pepela i vapnenca. Sinergija je istražena mjerenjem topline hidratacije na razini paste kao i određivanjem tlačne čvrstoće na uzorcima morta. U sklopu rada ispitane su koncentracije aktivnosti radionuklida u materijalima visokorezolucijskom gama-spektrometrijom s obzirom na to da ispitani materijali potječu od prirodnih ruda te se može očekivati određena doza radioaktivnosti.

Ključne riječi: crveni mulj, leteći pepeo, radioaktivnost, sinergija

Abstract

The idea of this research was to investigate the possible synergy between locally available red mud, fly ash and limestone. The synergy was investigated by measuring the heat of hydration at the paste level as well as compressive strength on the mortar level. As part of the work, the concentrations activity of radionuclides in materials were examined by high-resolution gamma spectrometry, since the tested materials originate from natural ores and it is normal to expect a natural radioactivity.

Keywords: red mud, fly ash, radioactivity, synergy

1. Uvod

Već dulji niz godina u cementnoj industriji upotrebljavaju se velike količine zamjenskih materijala za cement (engl. *Supplementary cementitious materials*) kao što su leteći pepeo, zgura, silicijska prašina i drugi „klasični“ alternativni materijali. Zbog smanjenja njihove dostupnosti pozornost se posvećuje i drugim sirovinama kao što je otpadni materijal iz aluminijske industrije, tzv. crveni mulj koji nastaje rafiniranjem boksitne rude, najčešće Bayerovim postupkom, gdje se usitnjena ruda otapa u koncentriranoj otopini Na(OH) na visokoj temperaturi od 270 °C. Zbog samoga načina obrade pH-vrijednost crvenoga mulja relativno je visoka (pH 10 – 12) te predstavlja ozbiljnu opasnost za okoliš u okolini deponije [1].

Zbog prisutnosti alkalija, visokoga udjela željezova oksida i finoće čestica upotreba crvenoga mulja ograničena je [2]. Međutim, mnoga istraživanja pokazala su kako je moguće koristiti crveni mulj kao dodatak u građevinskim materijalima [3],[4],[5]. Viši udio alkalija i finoća čestica mogu pomoći pri ostvarenju sinergije u kombinaciji s drugim sirovinama kao što su leteći pepeo, glina, zgura ili vapnenac [6].

Sirovine za dobivanje građevinskih materijala najčešće se dobivaju ili su porijeklom od prirodnih ruda, a s obzirom na to da su rude dobivene iz stijena i tla, u određenoj su mjeri radioaktivne. Kada je riječ o građevinskim materijalima, najčešće se govori o radionuklidima prirodnoga porijekla (PP radionuklidi), odnosno o radioaktivnim izotopima Radija ²²⁶Ra, Torija ²³²Th i Kalija ⁴⁰K koji potječu iz zemljine kore. Koncentracija ²²⁶Ra, ²³²Th i ⁴⁰K u građevnim materijalima ovisi o porijeklu materijala te je u skladu s time vrlo važno izmjeriti koncentraciju radionuklida u svim građevnim materijalima preuzetim s različitih mjesta kako bi se procijenila njihova opasnost za ljudsko zdravlje [7]. Količina radionuklida u nekome materijalu izražava se koncentracijom aktivnosti (engl. *Activity concentration*) kojoj je mjerna jedinica Bekerele po kilogramu (Bqkg⁻¹), a najčešće se mjeri visokorezolucijskom gama-spektrometrijom.

2. Materijali, sastav mješavina i metode

2.1. Materijali

U kombinaciji s komercijalnim cementom, CEM I 42.5 N, iz tvornice cementa Holcim Koromačno (Republika Hrvatska) korišten je crveni mulj (RM), nusprodukt aluminijske industrije iz Dobroga Sela kraj Mostara (Bosna i Hercegovina). Uz crveni mulj korišten je i leteći pepeo (FA) porijeklom iz termoelektrane Tuzla, Elektroprivrede (BiH) i vapnenac (LS) iz kamenoloma Zvečaj, Arkada (Republika Hrvatska). Kemijski sastav najzastupljenijih oksida korištenih sirovina prikazan je u Tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav korištenih materijala (%)

Oksidi, %	Cement opće namjene	Crveni mulj	Leteći pepeo	Vapnenac
SiO ₂	19,3	21,9	55,3	20,2
Al ₂ O ₃	4,9	16,9	19,7	4,3
Fe ₂ O ₃	2,9	37,9	9,0	1,4
CaO	64,0	10,0	8,3	71,6
MgO	1,8	0,6	2,9	1,7
Na ₂ O	0,2	7,2	0,7	< 0,01

2.2. Sastav mješavina

U svim mješavinama cement je zamijenjen s 20 % crvenoga mulja (RM), a potom je još dodatnih 20 % zamijenjeno s letećim pepelom (FA). Nadalje, 5 % vapnenca (LS) dodano je u mješavinu s crvenim muljem i letećim pepelom. Vodovezivni omjer svih mješavina iznosi 0,5. Mješavine su označene količinom zamjene cementa s određenim materijalom i skraćenicom toga materijala. Primjerice, u mješavini 20RM20FA5LS cement je zamijenjen s 20 % crvenoga mulja (RM), 20 % letećega pepela (FA) i 5 % vapnenca (LS).

Tablica 2. Sastavi mješavina cementnih kompozita

Oznaka mješavine	Maseni udjeli materijala u mješavini (%)			
	CEM I	RM	FA	LS
CEM	100	0	0	0
20RM	80	20	0	0
20RM20FA	60	20	20	0
20RM20FA5LS	55	20	20	5

2.3. Metode ispitivanja

Kako bi se odredila sinergija između crvenoga mulja, letećega pepela i vapnenca, mjerenje topline hidratacije na pastama referentne i mješavina sa zamjenskim materijalima provedeno je na 8-kanalnom TAM Air kalorimetru. Mjerenje topline hidratacije trajalo je tri dana na temperaturi od 20 °C.

Tlačna čvrstoća ispitana je na uzorcima morta prema normi EN 196-1. Nakon 24 sata uzorci su otkalupljeni i njegovani u vlažnoj komori (20° C i 95 % relativne vlažnosti) do termina ispitivanja. Tlačna čvrstoća ispitana je nakon 2, 7 i 28 dana.

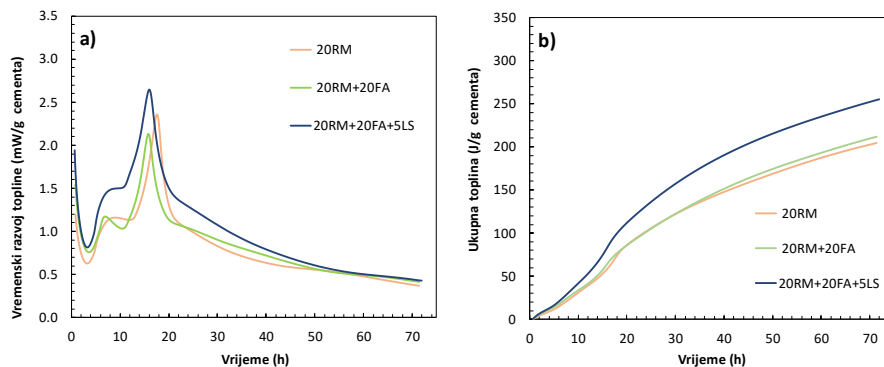
Sadržaj radionuklida u uzorcima određen je visokorezolucijskom gama-spektrometrijom proizvođača EG&G Ortec na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu. Prije ispitivanja uzorci su usitnjeni, a potom stavljeni u cilindrične posudice i hermetički zatvoreni. Tako pripremljeni stajali su oko 30 dana radi postizanja ravnoteže aktivnosti radionuklida. Radiološka analiza provedena je na detektorskom sustavu od kristala germanija visoke čistoće (HPGe, engl. *High purity germanium*).

3. Rezultati ispitivanja

Na Slici 1 prikazana je hidratacija cementnih pasti, a rezultati topline hidratacije normalizirani su po gramu cementa kako bi se bolje vidio sinergijski utjecaj alternativnih materijala na hidrataciju cementa.

Prvi vrh krivulje, koja odgovara mješavini 20RM20FA, promijenjen je u odnosu na mješavinu bez letećega pepela 20RM i više je izražen. Dodavanjem letećega pepela zbog različitih kemijskih i fizikalnih karakteristika očekivan je i drugačiji razvoj hidratacije zbog stvaranja drugih produkata. Dodavanjem samo 5 % vapnenca u sustav crvenoga mulja i letećega pepela vidljivo je povećanje vrhova u toplinskome toku te povećanje kumulativne oslobođene topline. Mješavina 20RM20FA5LS oslobađa najveću toplinu hidratacije, što ukazuje na povoljan sinergijski učinak između crvenoga mulja, letećega pepela i vapnenca [8].

Kalcijev karbonat, koji je najviše zastupljen mineral u vapnencu, reagira s aluminatnim hidratima iz crvenoga mulja i letećega pepela tvoreći nove produkte koji kasnije povoljno utječu na svojstva cementne paste [8].

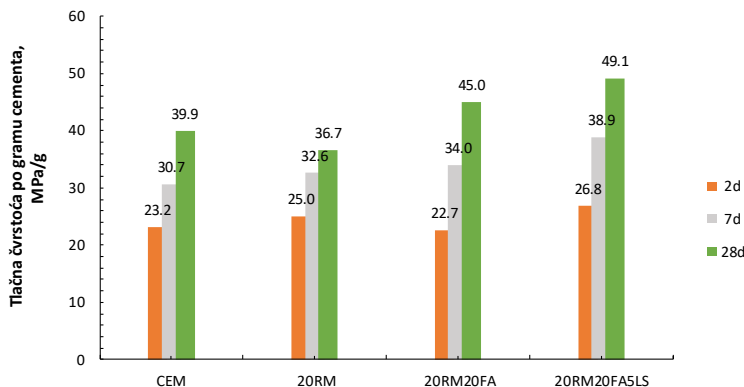


Slika 1. Jedinična toplina hidratacije izražena po gramu cementa; a) vremenski razvoj topline; b) ukupna toplina

Na Slici 2 prikazani su rezultati tlačne čvrstoće ispitane na uzorcima morta nakon 2, 7 i 28 dana, koji su, također, prikazani po gramu cementa kako bi se jasnije vidio doprinos mineralnih dodataka. Iz rezultata se može vidjeti kako dodavanje samo crvenoga mulja neznatno pridonosi razvoju tlačne čvrstoće u ranoj starosti, dok nakon 28 dana u uzorku s 20 % mulja tlačna čvrstoća opada. Dodavanjem letećega pepela vidi se doprinos čvrstoći nakon 7 i 28 dana u odnosu na referentnu mješavinu i mješavinu 20RM. Nadalje, kada je samo 5 % vapnenca dodano u mješavinu s crvenim muljem i letećim pepelom, povećale su se i rana i kasna čvrstoća te je očita sinergija između crvenoga mulja, letećega pepela i vapnenca.

Tablica 3. Tablični prikaz ukupne oslobođene topline po gramu cementa

Naziv uzorka	Ukupna oslobođena toplina (J/g cementa)
20RM	204,27
20RM20FA	211,78
20RM20FA5LS	255,18



Slika 2. Jedinična tlačna čvrstoća morta po gramu cementa nakon 2, 7 i 28 dana

Tablica 4. Tablični prikaz jedinične tlačne čvrstoće po gramu cementa

Naziv uzorka	Jedinična zlačna čvrstoća MPa/g cementa		
	2 dana	7 dana	28 dana
CEM	23,2	30,7	39,9
20RM	25,0	32,6	36,7
20RM20FA	22,7	34,0	45,0
20RM20FA5LS	26,8	38,9	49,1

Svaki građevni materijal sadrži različite koncentracije aktivnosti radionuklida ovisno o porijeklu i načinu obrade [7]. Iz Tablice 5 jasno se vidi kako uzorak crvenoga mulja ima veću koncentraciju aktivnosti ^{226}Ra i ^{232}Th u odnosu na ispitani leteći pepeo i cement. Pregledom literature utvrđeno je kako crveni mulj iz Mostara ima sličnu koncentraciju aktivnosti kao i muljevi s drugih lokaliteta [9][10].

Tablica 5. Koncentracije aktivnosti radionuklida u ispitanim uzorcima

Radionuklidi	Koncentracija aktivnosti (Bqkg^{-1})		
	Crveni mulj	Leteći pepeo	Cement
^{226}Ra	$(1,381 \pm 0,014)E + 2$	$(4,630 \pm 0,072)E + 1$	$(2,003 \pm 0,025)E + 1$
^{232}Th	$(3,251 \pm 0,036)E + 2$	$(3,261 \pm 0,151)E + 1$	$(1,052 \pm 0,073)E + 1$
^{40}K	$< (1,250 \pm 0,036)E + 1$	$(3,739 \pm 0,086)E + 2$	$(2,142 \pm 0,048)E + 2$

Iako crveni mulj kao zaseban materijal pokazuje relativno visoku koncentraciju aktivnosti i nije ga preporučljivo koristiti kao jedinu sirovinu za dobivanje građevnoga materijala, prema istraživanjima koja su proveli brojni autori može se koristiti kao dodatak betonu unutar sigurnosnih granica [11]. Količina crvenoga mulja u kompozitu s materijalima koji ne predstavljaju radiološku opasnost može se proračunati prema izrazu (1) [11]:

$$\frac{f_s \times C_{\text{Ra}} + (1-f_s) \times C'_{\text{Ra}}}{370} + \frac{f_s \times C_{\text{Th}} + (1-f_s) \times C'_{\text{Th}}}{260} + \frac{f_s \times C_{\text{K}} + (1-f_s) \times C'_{\text{K}}}{4200} \leq 1 \quad (1)$$

gdje je f_s udio ispitivanoga materijala u konačnome produktu, C_{Ra} , C_{Th} i C_{K} koncentracije aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K u (Bq kg^{-1}) u ispitanoj materijalu te C'_{Ra} , C'_{Th} i C'_{K} koncentracije aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K u (Bq kg^{-1}) u drugim materijalima koji bi se koristili u kombinaciji s crvenim muljem. Na temelju izraza (1) udio ispitivanoga crvenoga mulja u nekome kompozitu u kombinaciji s ispitanim cementom u okviru radiološke zaštite može iznositi i do 60 %.

4. Zaključak

Na temelju pregleda stanja područja gdje je korišten crveni mulj iz Dobroga Sela zaključuje se kako taj materijal ima potencijal za korištenje u hidrauličkome vezivu [12, 13]. U ovome radu provedena su ispitivanja topline hidratacije i tlačne čvrstoće kako bi se vidjelo postoji li sinergija između mulja, letećega pepela i vapnenca, što je na kraju potvrđeno te predstavlja dobar temelj za daljnja i detaljnija istraživanja. Također je provedena radiološka analiza koja ukazuje na povećanu koncentraciju radionuklida u uzorku crvenoga mulja. Njegovo korištenje u kompozitima sigurno je za ljudsko zdravlje i do 60 %.

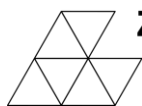
Zahvala

Ovaj je rad dio znanstvenoga projekta *Alternativna veziva za beton: razumijevanje mikrostrukture za predviđanje trajnosti*. ABC (UIP-05-2017-4767) koji financira Hrvatska zaklada za znanost.

Ovim putem zahvaljujemo prof. Merimi Šahinagić-Isović i dr. sc. Marku Čećežu s Univerziteta Džemal Bijedić u Mostaru, Elektroprivredi BiH i poduzeću Arkada Zvečaj na pomoći prilikom prikupljanja materijala.

Literatura

- [1] Danner, T., and Justnes, H.: Bauxite Residue as Supplementary Cementitious Material – Efforts to Reduce the Amount of Soluble Sodium, *Nord. Concr. Res.*, vol. 62, 2020., broj stranica (1–20), doi: 10.2478/ncr-2020-0001.
- [2] Kumar, A. and Kumar, S.: Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization, *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, 2013, broj stranica (865–871), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.013.
- [3] Lima, M.S.S, Thives, L.P., Haritonovs, V. and Bajars, K.: Red mud application in construction industry: Review of benefits and possibilities, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 251, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012033.
- [4] Yang, J. and Xiao B., Development of unsintered construction materials from red mud wastes produced in the sintering alumina process, *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, 2008, broj stranica (2299–2307), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.005.
- [5] Kavas, T.: Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick, *Build. Environ.*, vol. 41, 2006, broj stranica (1779–1783), doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.019.
- [6] Ribeiro, D.V., Labrincha, J.A., Morelli, M.R.: Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement, Vol.14, 2011, broj stranica (60–66), doi:10.1590/S1516-14392011005000001.
- [7] UNSCEAR, Sources and Effects of ionizing Radiation, UNSCEAR 2010 Report to the General Assembly, with Annexes, New York, USA, 2010.
- [8] De Weerd, K, Kjellsen, K.O., Sellevold, E. and Justnes, H.: Cement & Concrete Composites Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, 2011, broj stranica (30–38), doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.09.006.
- [9] Vukanac, I.S. *et al.*: Assessment of natural radioactivity levels and radon exhalation rate potential from various building materials, *Nucl. Technol. Radiat. Prot.*, vol. 35, 2020, (broj stranica) 64–73.
- [10] Somlai, J. Jobbágy, V. Kovács, J. Tarján, S. and Kovács, T.: Radiological aspects of the usability of red mud as building material additive, *J. Hazard. Mater.*, vol. 150, broj stranica (541–545), 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.004.
- [11] Gu, H., Wang, N., and Liu, S.: Radiological restrictions of using red mud as building material additive, *Waste Manag. Res.*, vol. 30, 2012, (broj stranica) 961–965, doi: 10.1177/0734242X12451308.
- [12] Čećez, M., Šahinagić-Isović, M.: Mortovi s dodatkom lokalnih nusproizvoda, *Građevinar*, vol. 71, 2019, (broj stranica) 1-7, doi: 10.14256/JCE.2358.2018
- [13] Čatović, F., Čećez, M.: Crveni mulj kao dodatak građevinskim materijalima, *m Kvadrat.*, 2018, (broj stranica) 74–77.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.18>

UTJECAJ UGLJIČNIH NANOCJEVČICA NA SVOJSTVA BETONA

INFLUENCE OF CARBON NANOTUBES ON CONCRETE PROPERTIES

Ivan Vrdoljak¹, Ivana Miličević²

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, ivrdoljak15@gfos.hr

(2) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, ivana.milicevic@gfos.hr

Sažetak

Rad prikazuje pregled stanja područja utjecaja ugljičnih nanocjevčica na tlačnu čvrstoću betona. Analiziran je utjecaj dodatka različitoga udjela i različitih vrsta ugljičnih nanocjevčica na svojstva betona te su prikazani kritički osvrt i smjernice za daljnja istraživanja.

Ključne riječi: beton, ugljične nanocjevčice, tlačna čvrstoća

Abstract

The paper presents an overview of carbon nanoparticle influence on the compressive strength of concrete. The influence of the addition of different proportions and different types of carbon nanoparticles on the properties of concrete was analyzed, and a critical review and guidelines for further research were given.

Keywords: concrete, carbon nanotubes, compressive strength

1. Uvod

Ugljične nanocjevčice alotropi su ugljika [1]. Prvi se put spominju u lijimovu istraživanju [2] iz 1991. godine u kojem je napravljen prvi korak u otkrivanju do tada nepoznatoga strukturnog oblika ugljika. Danas, tridesetak godina kasnije, ugljične nanocjevčice dobro su poznat materijal koji odlikuju visoka vlačna čvrstoća, odlična električna i toplinska vodljivost i mala težina. Ugljične nanocjevčice pripadaju kategoriji ugljičnih vlakana koji se dijele na jednozidna ugljična vlakna, vlakna s višezidnim nanocjevčicama, grafiška vlakna i grafenska vlakna [3]. Dobile su naziv zbog vrlo male veličine koja je oko 50 000 puta manja od ljudske dlake [1]. Ugljične cjevčice sastoje se od grafita smotanoga u cilindrični oblik s vrlo malim promjerom (nekoliko nanometara), čiji omjer duljine i promjera prelazi 10 000 [1]. Krajevi cilindra obično su zatvoreni polufulerenskim strukturama [3]. Dijeje se na jednozidne (*single-walled carbon nanotubes*) i na višezidne (*multi-walled carbon nanotubes*). Tri najčešća načina proizvodnje ugljičnih nanocjevčica su lučno pražnjenje, laserska ablacija i katalizacija [4]. Najveće su prednosti takvih materijala njihova visoka vlačna čvrstoća (oko 100 puta viša od čelika [5]), toplinska provodljivost (duplo viša od toplinske provodljivosti dijamanta [5]) i električna provodljivost. Poboljšanje električne provodljivosti može biti vrlo korisno pri korištenju tzv. pametnih betona u kojima se vrši monitoring naprezanja, deformacija i slično [6]. Zbog mnogih prednosti koje imaju ove nanocjevčice prati ih i poprilično visoka cijena. S godinama dolazi do sve većega razvoja proizvodnje ugljičnih nanocjevčica te se pretpostavlja kako će i cijena postajati sve prihvatljivija [7]. Ugljične nanocjevčice jedan su od najčvršćih poznatih materijala u smislu vlačne čvrstoće [1]. Pod većom količinom vlačnoga naprezanja karbonski će se cilindri plastično deformirati, odnosno deformacije će biti trajne. To se događa kod deformacija od približno 5 %, čime se može povećati maksimalno naprezanje prije loma [1]. Ugljične nanocjevčice puno su učinkovitije u podnošenju vlačne čvrstoće u odnosu na tlačnu čvrstoću. Zbog svoga šupljeg cilindričnog oblika i puno veće duljine u odnosu na svoj promjer prilikom tlačnoga naprezanja dolazi do izvijanja [1]. Zbog visokoga modula elastičnosti i visoke vlačne čvrstoće pretpostavlja se kako bi uporaba ugljičnih nanocjevčica u kompozitnome materijalu pozitivno pridonijela poboljšanju svojstava takvoga materijala [8]. Uz mnoga dobra svojstva, ugljične nanocjevčice imaju potencijalno negativan učinak na ljudsko zdravlje. Vjeruje se da zbog svoje vrlo tanke, dugačke građe i netopivosti mogu imati štetne učinke na pluća poput azbesta [9]. Dugoročan učinak ugljičnih nanocjevčica na zdravlje još nije u potpunosti definiran [10] te je upravo zbog toga potrebno vrlo oprezno rukovati s njima.

2. Utjecaj ugljičnih nanocjevčica na tlačnu čvrstoću

U Tablici 1 prikazani su rezultati istraživanja koji su pokazali kako se dodavanjem ugljičnih nanocjevčica betonu u velikoj većini slučajeva mogu poboljšati čvrstoće u odnosu na čvrstoće referentnoga betona. Istraživači su zaključili kako postoje tri razloga zbog kojih dolazi do poboljšanja svojstava, a to su: utjecaj premošćivanja (*bridging effect*), svojstvo nukleacije i utjecaj punila. Zbog svoga oblika (velika duljina u odnosu na promjer) nanocjevčice djeluju kao mostovi preko mikropukotina te tako stvaraju vezu koja prenosi opterećenje, tzv. premošćivanje [11], [12], [13], [14], [15]. Prilikom njege betona vodom primijećeno je razvijanje većih promjera pukotina u odnosu na njegu betona izlaganjem višim temperaturama [16]. Razvijanje visoke rane čvrstoće i ubranu hidrataciju istraživači pripisuju efektu nukleacije ([16], [13], [17], [18]) koji podrazumijeva ponašanje ugljičnih nanocjevčica kao adsorpcijskih jezgri koje zbog svoje velike

specifične površine i velike površinske aktivnosti na sebe vežu vodu, ione i hidratacijske produkte, što dovodi do povećanja čvrstoća [15]. U istraživanju Makara i sur. [18] pokazalo se kako uzorci s karbonskim nanocjevčicama postižu veće vrijednosti mikročvrstoća u odnosu na one bez njih. Pod utjecajem punila smatra se popunjavanje šupljina betona pomoću ugljičnih nanocjevčica. Pretpostavlja se kako su unutarnje pore promjera oko 3 nm do 10 nm. Takav prostor može se popuniti korištenjem ugljičnih nanocjevčica promjera do 9 nm. Kapilarne pore imaju promjere veće od 10 nm, stoga u njih može stati i više ugljičnih nanocjevčica [19].

Tablica 1. Čvrstoće betona s dodavanjem ugljičnih nanocjevčica kao primjese

Istraživanje	Vrsta betona	Udio ugljičnih nanocjevčica	Tlačna čvrstoća [MPa]	Tlačna čvrstoća [%]	Izvor
Madhavi i sur. (2013.)	PCB	0 %	38,2	100,0	[19]
		0,015 %	41,5	108,5	
		0,03 %	45,2	118,1	
		0,045 %	49,2	128,7	
Ruan i sur. (2018.)	RPB	0 %	101,0	100,0	[16]
		0,25 %	116,6	115,4	
		0,5 %	120,5	119,3	
Hawreen i sur. (2019.)	PCB	0 %	47,5	100,0	[13]
		0,1 %	57,5	109,7	
		0,5 %	51,2	93,7	
Wille, Loh (2010.)	BVČ	0 %	325,0	100,0	[20]
		0,022 %	327,0	100,6	
Baloch i sur. (2018.)	PCB	0 %	26,0	100,0	[21]
		0,08 %	27,0	103,8	
Lu i sur. (2016.)	BVČ	0 %	116,7	100,0	[22]
		0,05 %	122,1	104,6	
		0,15 %	114,4	98,0	
Hamzaoui (2012.)	PCB	0 %	34,0	100,0	[23]
		0,003 %	39,5	116,2	
		0,010 %	35,0	102,9	
Carrico i sur. (2018.)	PCB	0 %	47,0	100,0	[11]
		0,05 %	50,0	106,4	
Torsten (2004.)	PCB	0 %	150,0	100,0	[24]
		0,5 %	165,0	110,0	
		1,0 %	160,0	106,7	

*PCB – portland cement beton; RPB – reaktivni praškasti beton; BVČ – beton visoke čvrstoće

Iz rezultata istraživanja prikazanih u Tablici 1 može se zaključiti kako tlačne čvrstoće rastu do određenoga udjela ugljičnih nanocjevčica u betonu, nakon čega se događa pad. Iznimku ovomu načinu kretanja čvrstoća pokazuju istraživanja Madhavi [19] i Ruana [16] gdje se događa konstantan rast. Pretpostavka je kako bi se u tim istraživanjima daljnjim povećanjem udjela ugljičnih nanocjevčica u nekome trenutku počeo događati pad. Taj pad čvrstoća događa se zbog lokalne aglomeracije (nakupljanje, zgrudavanje zrna) i njihovim međusobnim namotavanjem [16]. Pojava aglomeracije ovisi o količini ugljičnih nanocjevčica i o njihovim dimenzijama. Primjerice,

pri duljim nanocjevčicama prije dolazi do aglomeracije što dovodi do većega smanjenja čvrstoća [13]. To objašnjava zašto se u istraživanjima u Tablici 1 pri različitim udjelima pojavio pad čvrstoća.

Dodatni utjecaji koji utječu na razvoj čvrstoća su: vrsta nanocjevčica, tehnika disperzije nanocjevčica, razmak čestica u smjesi i način njege betona. Hawreen i sur. [13] i Carrico i sur. [11] u svojim istraživanjima proučavali su utjecaj različitih vrsta ugljičnih nanocjevčica. Rezultati su pokazali kako vrsta ugljičnih nanocjevčica ima utjecaja, no isti nije toliko važan. Primjerice, u istraživanju Hawreena i sur. [13] ispitivao se utjecaj pet različitih vrsta ugljičnih nanocjevčica. Rezultati su pokazivali relativno slične čvrstoće za pojedine vrste nanocjevčica. Analizirajući rezultate utjecaja ugljičnih nanocjevčica pri vodocementnome omjeru 0,55, potrebno je napomenuti kako se u većini slučajeva dodatkom ugljičnih nanocjevčica dogodio porast, neovisno o vrsti nanocjevčica. Najveći porast tlačne čvrstoće beton je imao pri korištenju ugljične nanocjevčice komercijalnoga naziva TNM8 s udjelom od 0,1 % u odnosu na masu cementa. Tada je tlačna čvrstoća narasla u odnosu na referentni uzorak s 47,5 MPa na 57,5 MPa. Kretanje tlačne čvrstoće u betonu u odnosu na kretanja u istraživanjima koja su koristila mortove i cementne paste vrlo se dobro podudaraju [13]. Ugljične nanocjevčice s $-OH$ i $-COOH$ vezom manje su sklone aglomeraciji zbog svoje hidrofilnosti radi koje se ojačava veza sa sredinom u kojoj se nalazi. Također, one zahtijevaju veću apsorpciju vode što otežava proces hidratacije [13]. Jedan je od problema koji se pojavljuje pri dodavanju ugljičnih nanocjevčica u beton učinkovita disperzija. Uspješan način disperzije opisan je u istraživanju Willea i Loha [20]. Disperzija ugljičnih nanocjevčica u betonu obavljena je pomoću superplastifikatora baziranoga na poli(karboksilat eteru). Tako su uspješno ukomponirane ugljične nanocjevčice u beton bez negativnoga utjecaja na obradivost. Kao što je ranije napisano, jedan od čimbenika koji utječe na razvijanje čvrstoća svakako je i njega betona. Ruan i sur. [16] istraživali su razliku u svojstvima betona s karbonskim nanocjevčicama za dva različita načina njege betona. U većini slučajeva pokazalo se kako su mehanička svojstva betona s karbonskim nanocjevčicama bila bolja pri njezi na višim temperaturama nego vodom. Primjerice, tlačna čvrstoća betona s udjelom ugljičnih nanocjevčica od 0,25 % bila je približno 118 MPa pri njezi betona vodom, dok je za isti udio ugljičnih nanocjevčica i njegu betona toplinom tlačna čvrstoća iznosila približno 140 MPa. Sličan prirast pojavljuje se i kod čvrstoće na savijanje gdje je čvrstoća u betonu s istim udjelom ugljičnih nanocjevčica njegovanim vodom iznosila približno 18 MPa, dok je u betonu njegovanom toplinom iznosila približno 20 MPa.

3. Zaključak

Pregledni članak bavio se istraživanjem dostupne literature u svezi s utjecajem dodatka ugljičnih nanocjevčica na svojstva betona. Ugljične nanocjevčice materijali su koji imaju vlačnu čvrstoću približno stotinu puta veću od čelika, duplo višu termalnu provodljivost od dijamanta te vrlo uspješnu električnu provodljivost [5]. Visoka električna provodljivost omogućava vrlo učinkovitu primjenu u tzv. pametnim betonima gdje se obavljaju nadzor naprezanja, deformacija, pukotina i slično [6]. Sve ove dobre karakteristike čine ih vrlo pogodnima za primjenu s konvencionalnim građevinskim materijalima, čime se otvara mogućnost poboljšavanja svojstava takvih kompozitnih građevinskih materijala (dosezanje većih čvrstoća, veća otpornost na stvaranje pukotina i slično). Nekolicina autora navodi potencijalno štetan učinak ove vrste čestica na zdravlje čovjeka, odnosno

navode da zbog svoga oblika i netopivosti u plućima ugljične nanocjevčice mogu djelovati poput azbesta na pluća čovjeka [9].

Na temelju dostupnih istraživanja dodataka ugljičnih nanocjevčica betonu mogu se donijeti sljedeći zaključci o kretanju tlačne čvrstoće:

- u određenome udjelu ugljične nanocjevčice mogu se uspješno koristiti za poboljšanje tlačne čvrstoće betona
- glavni su razlozi poboljšanja tlačne čvrstoće betona uslijed dodavanja ugljičnih nanocjevčica efekt premošćivanja, utjecaj punila i svojstvo nukleacije
- rezultati dostupnih istraživanja pokazali su kako različite vrste ugljičnih nanocjevčica rezultiraju blagim razlikama u promjeni tlačne čvrstoće betona
- dodavanje previsokoga udjela ugljičnih nanocjevčica u beton rezultira padom čvrstoće uslijed pojave aglomeracije (grupiranja, namotavanja) čestica.

Kako su ugljične nanocjevčice materijali s visokim potencijalom, predlaže se istraživanje ostalih mogućih primjena ugljičnih nanocjevčica u građevinarstvu, poput poboljšanja električne provodljivosti kompozitnih materijala ili poboljšanja zaštite od elektromagnetskoga zračenja koristeći ugljične nanocjevčice.

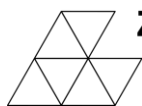
Zahvale

Ovo istraživanje provedeno je u okviru operativnoga programa *Konkurentnost i kohezija 2014. – 2020.*, Europskoga fonda za regionalni razvoj, projekt naziva: *Razvoj i primjena naprednih građevinskih materijala za izgradnju zdravih zgrada: zaštita od neionizirajućeg zračenja-Z2grade*, KK.01.1.1.04.0105

Literatura

- [1] P. Shahmohamadi and F. Soflaee, "The combination of clay and nanotube carbon as an innovative and sustainable material," vol. 2, no. September, pp. 959–963, 2007.
- [2] Sumio Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, pp. 56–58, 1991.
- [3] R. Neimarlija, "Karbonska vlakna." 2013.
- [4] V. N. Popov, "Carbon nanotubes: Properties and application," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 43, no. 3, pp. 61–102, 2004, doi: 10.1016/j.mser.2003.10.001.
- [5] R. Siddique and A. Mehta, "Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 116–129, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.019.
- [6] A. Meoni *et al.*, "An experimental study on static and dynamic strain sensitivity of embeddable smart concrete sensors doped with carbon nanotubes for SHM of large structures," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 3, pp. 1–19, 2018, doi: 10.3390/s18030831.
- [7] A. M. Thayer, "Carbon nanotubes by the metric ton," *Chem. Eng. News*, vol. 85, no. 46, pp. 29–35, 2007, doi: 10.1021/cen-v085n046.p029.
- [8] G. Overney, W. Zhong, and D. Tománek, "Structural rigidity and low frequency vibrational modes of long carbon tubules," *Zeitschrift für Phys. D Atoms, Mol. Clust.*, vol. 27, no. 1, pp. 93–96, 1993, doi: 10.1007/BF01436769.

- [9] C. A. Poland *et al.*, “Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 3, no. 7, pp. 423–428, 2008, doi: 10.1038/nnano.2008.111.
- [10] Y. Zhao, G. Xing, and Z. Chai, “Are carbon nanotubes safe,” vol. 3, no. April, pp. 191–192, 2008.
- [11] A. Carriço, J. A. Bogas, A. Hawreen, and M. Guedes, “Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 121–133, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221.
- [12] A. Hawreen and J. A. Bogas, “Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 198, pp. 70–81, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.253.
- [13] A. Hawreen, J. A. Bogas, and R. Kurda, “Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 10, pp. 8361–8376, 2019, doi: 10.1007/s13369-019-04096-y.
- [14] B. Wang, Y. Han, and S. Liu, “Effect of highly dispersed carbon nanotubes on the flexural toughness of cement-based composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 46, pp. 8–12, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.014.
- [15] X. Cui *et al.*, “Mechanical properties and reinforcing mechanisms of cementitious composites with different types of multiwalled carbon nanotubes,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 103, pp. 131–147, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.10.001.
- [16] Y. Ruan, B. Han, X. Yu, W. Zhang, and D. Wang, “Carbon nanotubes reinforced reactive powder concrete,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 112, no. June, pp. 371–382, 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.06.025.
- [17] O. A. Mendoza Reales *et al.*, “Reinforcing Effect of Carbon Nanotubes/Surfactant Dispersions in Portland Cement Pastes,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/2057940.
- [18] J. M. Makar, J. Margeson, and J. Luh, “Carbon nanotube/cement composites - early results and potential applications,” *NRC Publ. Rec.*, pp. 1–10, 2005, [Online]. Available: <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?lang=en>.
- [19] Dr.T.Ch.Madhavi, Pavithra.P Singh, Sushmita Baban, and S.B.Vamsi Raj, “Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes On Mechanical Properties of Concrete,” *Int. J. Sci. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 166–168, 2012, doi: 10.15373/22778179/june2013/53.
- [20] K. Wille and K. J. Loh, “Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes,” *Transp. Res. Rec.*, no. 2142, pp. 119–126, 2010, doi: 10.3141/2142-18.
- [21] W. L. Baloch, R. A. Khushnood, and W. Khaliq, “Influence of multi-walled carbon nanotubes on the residual performance of concrete exposed to high temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 185, pp. 44–56, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.051.
- [22] L. Lu, D. Ouyang, and W. Xu, “Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes,” *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 6, pp. 1–11, 2016, doi: 10.3390/ma9060419.
- [23] R. Hamzaoui, A. Bennabi, S. Guessasma, M. R. Khelifa, and N. Leklou, “Optimal carbon nanotubes concentration incorporated in mortar and concrete,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 587, pp. 107–110, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.587.107.
- [24] K. Torsten, “Influence of surface-modified Carbon Nanotubes on Ultra-High Performance Concrete,” in *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, 2004, pp. 195–202.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.19>

IDENTIFIKACIJA HIDROGEOLOŠKOGA REŽIMA CRVENOGA JEZERA ANALIZOM GLAVNE RECESIJSKE KRIVULJE

IDENTIFICATION OF THE HYDROGEOLOGICAL REGIME OF RED LAKE BY MASTER RECESSIION CURVE ANALYSIS

Adrijana Vrsalović¹, Ivo Andrić¹, Ognjen Bonacci¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, avrsalovic@gradst.hr; ivo.andric@gradst.hr; obonacci@gradst.hr

Sažetak

U ovome radu analizirani su postojeći podatci količine oborina te razina voda u Crvenome jezeru, jednomu od krških jezera pokraj Imotskoga. Radi boljega razumijevanja hidrogeološkoga funkcioniranja jezera analizirane su kvazirecesijske krivulje dobivene na temelju postojećih podataka mjerenih vodostaja u razdoblju od 28. rujna 2013. do 20. ožujka 2019. godine. Glavna recesijska krivulja (MRC) izdvojena je korištenjem *Adapted matching strip* metode, *Tabulation* metode i metode po Petrašu. Dominantni hidrogeološki mehanizam identificiran je pomoću kvazikoeficijentata recesije koji definiraju odnos komponenata izravnoga i podzemnoga otjecanja.

Ključne riječi: Crveno jezero, glavna recesijska krivulja, kvazikoeficijent recesije

Abstract

In this paper, the existing data on precipitation and water level in Red Lake, one of the karst lakes near the town of Imotski, were analyzed. Therefore, to better understand the hydrogeological functioning of the lake, an analysis of the obtained quasi recession curves (QRC), based on the available data of the measured water levels during the period from 28 September 2013 to 20 March 2019, was carried out. The master recession curve (MRC) was obtained using the Adapted matching strip method, the Tabulation method and the Petras method. The dominant hydrogeological mechanism was identified using quasi recession coefficients, which define the ratio between recharge components of groundwater and direct runoff.

Keywords: Red Lake, master recession curve, quasi recession coefficient

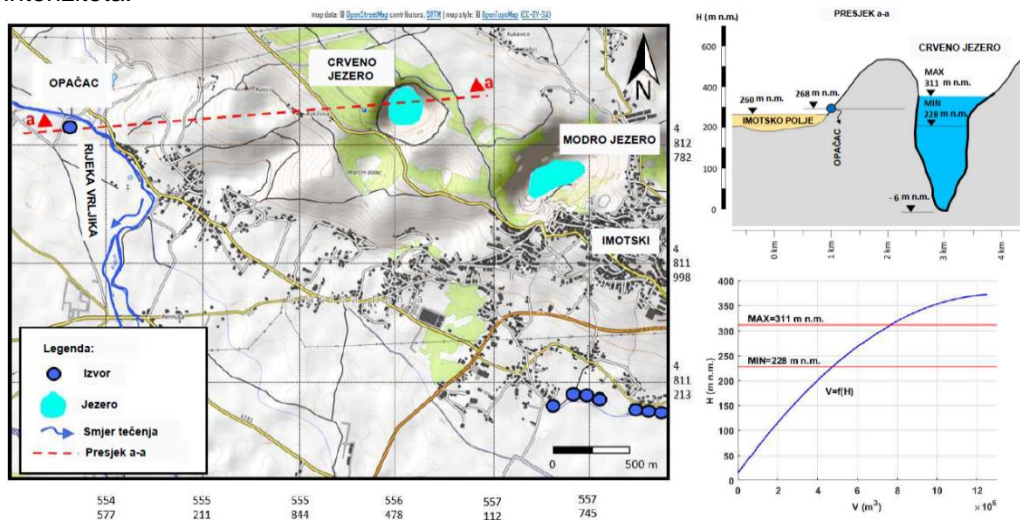
1. Uvod

Crveno jezero jedno je od najdubljih potopljenih krških fenomena Dinarskoga krša [1]. Nalazi se u neposrednoj blizini Imotskoga i okruženo je strmim padinama što otežava pristup jezeru, ali i istraživanja i mjerenja koja tada zahtijevaju veća financijska sredstva. Upravo je zbog toga očit nedostatak mjerenja kao i znanstvenih radova o istome [1,2]. Geološku građu razmatranoga područja većinom čine karbonatne stijene, pretežito vapnenci te djelomično dolomiti tercijara i krede, dok pojedine dijelove Imotskoga polja prekrivaju i naslage aluvija, lapora, pijeska i gline [2,3]. Područje Imotskoga polja bogato je vodom s velikim brojem jezera, stalnih i povremenih izvora, a glavninu količine voda donosi stalni vodotok Vrljike. Granice sliva još su uvijek neodređene. Nepoznato je i hidrogeološko funkcioniranje područja kao i kretanje vode u podzemlju zbog iznimne kompleksnosti područja koje proizlazi iz različite geološke građe i različitih kapaciteta podzemnih vodnih tokova [2-5].

U ovome radu analizirat će se postojeći podatci mjerenih vodostaja Crvenoga jezera u razdoblju od 28. rujna 2013. do 20. ožujka 2019. godine. S obzirom na to da Crveno jezero u usporedbi s Modrim jezerom nikad ne presušuje, ključno je identificirati dominantan hidrogeološki mehanizam.

2. Materijali i metode

Analiza hidrogeološkoga funkcioniranja jezera napravljena je na temelju raspoloživih podataka mjerenih vodostaja. Vrijednosti količina padalina s mjerne postaje *Imotski* poslužile su za bolje razumijevanje odgovora jezera na padaline različita trajanja i intenziteta.



Slika 1. Karta Imotskoga polja, prikaz geometrije Crvenoga jezera i krivulje zapremnine jezera (V) u funkciji razine vode (H) s pripadnim povijesnim maksimumom i minimumom

Batimetrijom i geometrijom jezera ustvrdili su Bonacci i Andrić [1,2] na temelju opsežnih istraživanja koristeći optički uređaj LIDAR i robotnu ronilicu (ROV) s ugrađenim sonarom. Na temelju provedenih istraživanja definirali su i krivulju zapremnine jezera u funkciji razine vode koja je u ovome radu korištena kao osnova za izračun vrijednosti volumena jezera. Na Slici 1, osim krivulje zapremnine, prikazana je i geometrija jezera s

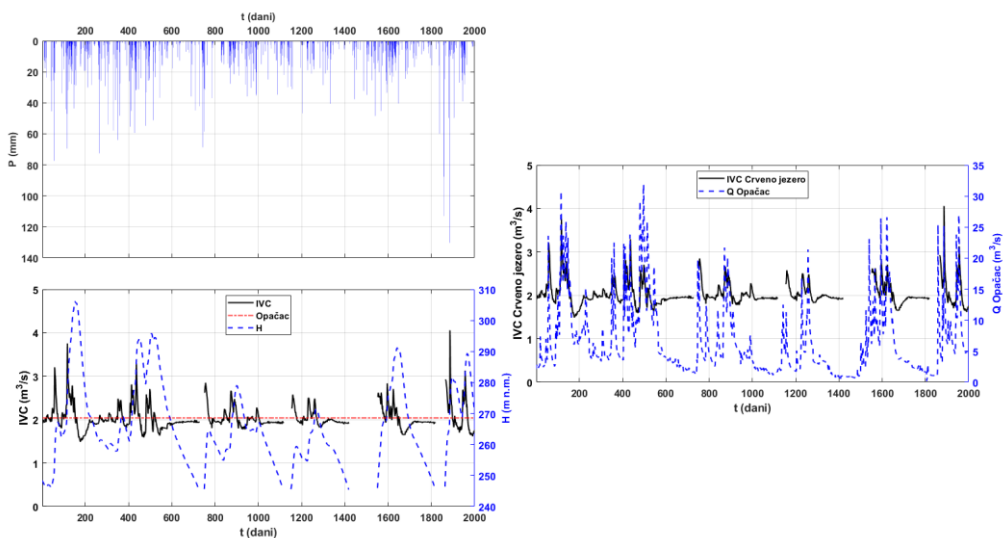
povijesnim minimumom od 228 m n. m., maksimumom od 311 m n. m. te pretpostavljenim položajem dna na - 6 m n. m.

Za svaku vrijednost vodostaja primjenom prethodno opisane funkcije dobivene su pripadne vrijednosti volumena jezera. Dnevni podatci promjene razine vode u jezeru impliciraju i dnevnu promjenu zapremnine jezera. Promjena zapremnine jezera na razini dana izražena je kao promjena integralnih količina ulaza i izlaza (IVC_i). Kako bi se izbjegle negativne vrijednosti integralnih količina voda, izvršena je transformacija podataka dodavanjem maksimuma izračunatih količina svakoj od vrijednosti (IVC_i).

$$IVC_i = (V_{i+1} - V_i) / \Delta t \quad (1)$$

$$IVC_r = IVC_i + \max(IVC_i) \quad (2)$$

Raspoloživi podatci vodostaja jezera s pripadnim količinama oborina s mjerne postaje *Imotski* kao i izračunate promjene integralnih količina voda u jezeru prikazani su na Slici 2. Promjene integralnih količina voda u Crvenome jezeru uspoređene su i s protocima na izvoru Opačac.



Slika 2. Hijetogram; Prikaz integralnih promjena količina voda (IVC) u vremenu (t), mjenjenih vodostaja (H) s naznačenom kotom izvora Opačac (268,5 m n. m.); Usporedba integralnih promjena količina voda u Crvenome jezeru (IVC) i protoka na izvoru Opačac (Q)

Identifikacija vodonosnoga sustava izvršena je izdvajanjem recesijskih razdoblja iz promjena integralnih količina voda u vremenu. Svako je recesijsko razdoblje kratkoročan događaj specifičnih karakteristika ovisan o načinu skladištenja vode, brzini pražnjenja podzemnih zalih, gubitcima, ali i o značajkama vodonosnika [6]. S obzirom na izrazitu varijabilnost pojedinačnih recesijskih segmenata kreirana je anvelopa individualnih recesijskih segmenata koja daje uvid u prosječne karakteristike komponenata otjecanja, odnosno hidrološko funkcioniranje samoga jezera i okolnoga područja. Anvelopa individualnih recesijskih segmenata naziva se glavnom recesijskom krivuljom (engl. *Master recession curve* – MRC). Glavna recesijska krivulja konstruirana

je korištenjem *Adapted matching strip* metode, *Tabulation* metode te metode po Petrašu [6-11].

Tabulation metoda, najjednostavnija od navedenih metoda, sastoji se od sortiranja individualnih recesijskih segmenata od viših prema manjima i razvrstavanja recesijskih segmenata po stupcima dok se horizontalno ne poklope [9,10].

Adapted matching strip metoda uključuje crtanje svih recesijskih segmenata, superponiranje te horizontalno pomicanje do formiranja MRC-a [6]. Ova je metoda nepraktična u velikome broju recesijskih segmenata te se primjenjuje prilagođena inačica *Adapted matching strip* metode [7,8]. Prvi je korak ove metode sortiranje recesijskih segmenata po veličini. Prvi recesijski segment, segment s najvećom početnom vrijednošću, testira se s različitim regresijskim modelima (linearni, eksponencijalni, logaritamski itd.). Model s najvećom vrijednošću koeficijenta determinacije (R^2) jest onaj koji najbolje opisuje promatranu recesiju. Drugi po veličini recesijski segment zatim se translata na odgovarajuću poziciju prve krivulje. Sljedeći je korak testiranje kompozitne krivulje prvoga i drugoga recesijskoga segmenta s regresijskim modelima. Odabire se regresijski model koji najbolje opisuje krivulju te se sljedeći recesijski segment translata na odgovarajuću poziciju prethodno definirane krivulje. Postupak se ponavlja za sve recesijske segmente u razmatranju.

Prema Petrašu [11] svaku krivulju recesije moguće je razdvojiti na više segmenata i modelirati Mailletovom jednadžbom. Tako je svaki segment definiran parametrima jednadžbe – koeficijentom recesije α i početnim protokom Q_0 koji predstavlja ordinatu krivulje za vrijeme $t=0$.

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (3)$$

Prikaz krivulje definirane Mailletovom jednadžbom na polulogaritamskom mjerilu jest pravac, a jednadžba je analitičke krivulje:

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0,4343 \cdot \alpha \cdot t \quad (4)$$

Svaki pojedinačni segment modelira se navedenom eksponencijalnom funkcijom, određuju se parametri jednadžbe te se principom superpozicije krivulje spajaju u jedinstvenu krivulju.

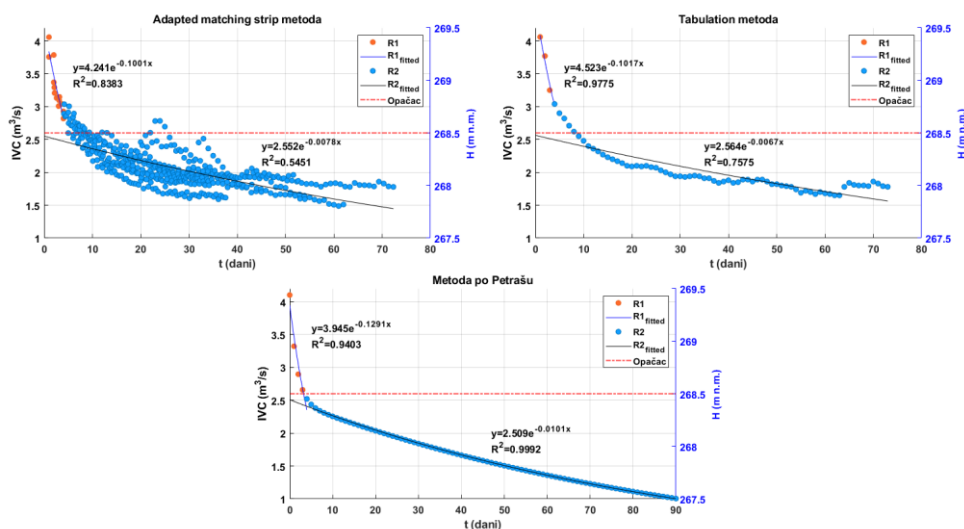
S obzirom na to da je predmet istraživanja jezero, a ne vodotok, prikaz kretanja integralnih količina voda ne može se nazvati hidrogramom jer te količine uključuju ulazne i izlazne količine voda u jezero. Isto vrijedi i za krivulje recesije koje u ovome slučaju odražavaju oscilacije u kretanju količina voda tijekom bezoborinskoga razdoblja na temelju čega se definiraju kao kvazirecesijske krivulje.

3. Rezultati

Kvazirecesijske krivulje izdvojene su iz prikaza integralnih promjena ulaznih i izlaznih količina voda u jezero. Rezultati analize recesijskih razdoblja i pripadne glavne recesijske krivulje prikazani su na Slici 3. Primjena različitih metoda pri analizi kvazirecesijskih krivulja rezultirala je prosječnim koeficijentima brzoga i sporoga odnosno baznoga otjecanja. Koeficijent brzoga otjecanja α_1 podrazumijeva brzo pražnjenje kanala i pukotina u kršu te propusniji vodonosnik, dok koeficijent sporoga otjecanja α_2 ukazuje na sporo pražnjenje podzemnih rezervi. Izračunate vrijednosti prosječnih koeficijenta recesije prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Izračunate vrijednosti koeficijenata recesije

Metoda	α_1	α_2
<i>Tabulation</i>	0,1017	0,0067
<i>Adapted matching strip</i>	0,1001	0,0078
<i>Petraš</i>	0,1291	0,0101
Prosjek:	0,1103	0,0082


Slika 3. Prikaz glavnih recesijskih krivulja po odabranim metodama

Promjena vrijednosti kvazirecesijskih koeficijenata vidljiva je lomom na glavnoj recesijskoj krivulji. Također je vidljiva i na grafu promjena integralnih količina ulaza i izlaza u jezero gdje je promjena nagiba evidentna na razini vode od 268,5 m n. m., nadmorskoj visini izvora Opačac (Slika 2). Uočava se prelijevanje vode iz jezera prema Opačcu pri višim razinama vode. Također se pri višim vodostajima bilježi i iznimno brzo otjecanje, što zapravo ukazuje na postojanje podzemne veze izvora s jezerom u obliku većega podzemnog prolaza.

4. Zaključak

Na temelju raspoloživih podataka analizirano je hidrogeološko funkcioniranje Crvenoga jezera. Analizom padalina s mjerne postaje *Imotski* i integralnih količina ulaza i izlaza iz jezera uočeno je kako jezero ne reagira na kiše kratkoga trajanja, neovisno o njihovu intenzitetu. Registriraju se većinom kiše duljega trajanja koje akumuliraju veću količinu vode nakon čega dolazi do aktiviranja brzoga otjecanja. U hidrogeološkome funkcioniranju jezera važnu ulogu imaju i podzemne vode, zbog čega jezero nikada ne presušuje. Na temelju dobivenih rezultata pretpostavlja se postojanje veze jezera i izvora Opačac za vodostaje iznad 268,5 m n. m.

Izračunati kvazirecesijski koeficijenti ukazuju na dominaciju matrice stijena u kršu što uzrokuje sporo ocjeđivanje vode iz manjih pora i pukotina. Navedeno proizlazi iz činjenice kako je Crveno jezero s okolicom područje s izraženim obilježjima krša,

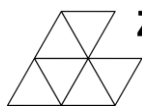
građeno od vapnenca i dolomita iz doba Jure i Krede. Na veličinu kvazikoeficijenta recesije utječu i karakteristike vodonosnika – veličina, oblik, propusnost kao i podzemne veze koje u ovome slučaju nisu dovoljno istražene. Daljnja istraživanja pridonijela bi boljemu razumijevanju hidrogeološkoga funkcioniranja Crvenoga jezera, ali i okolice s ostalim krškim jezerima.

Zahvala

Ovaj rad podržan je projektom KK.05.1.1.02.0024 *VODIME – Vode Imotske krajine*, koji je bio prijavljen na Poziv na dostavu projektnih prijedloga *Shema za jačanje primijenjenih istraživanja za mjere prilagodbe klimatskim promjenama* KK.05.1.1.02., financiran iz Europskoga fonda za regionalni razvoj, Operativni program Konkurentnost i kohezija.

Literatura

- [1] Andrić, I., Bonacci, O., Jukić, B.: Hidrološka mjerenja na Crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015., *Hrvatske vode*, 25, 2017, 102, 253–258.
- [2] Andrić, I., Bonacci, O.: Morphological study of Red lake in Dinaric karst based on terrestrial laser scanning and sonar system, *Acta Carsologica / Karsoslovni Zbornik*, 43/2–3, 2014, 229–239, <https://doi.org/10.3986/ac.v43i2.712>
- [3] Bojanić, L.; Ivčić, D.; Batić, V.: Hidrogeologija Imotskog polja s osvrtom na značaj u regionalnom smislu, *Geološki vjesnik*, 34, 127–135, Zagreb 1981.
- [4] Petrik, M.: Hidrografska mjerenja u okolici Imotskog. *Ljetopis JAZU*, vol.64, 266–286, Zagreb, 1960.
- [5] Roglić, J.: Imotsko polje (Fizičko geografske osobine). Posebna izdanja Geografskog društva, vol.21, 1–125, Beograd, 1938.
- [6] Nathan, R.J.; McMahon, T.A.: Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26 (7), 1465–1473, 1990, <https://doi.org/10.1029/wr026i007p01465>
- [7] Posavec, K.; Bačani, A.; Nakić, Z.: A Visual Basic Spreadsheet Macro for Recession Curve Analysis, *Ground Water*, Vol. 44, No. 5, 764–767, 2006, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x>
- [8] Posavec, K.; Parlov, J.; Nakić, Z.: Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation, *Ground Water*, Vol. 48, No. 4, 598–603, 2010, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00669.x>
- [9] Sujono, J.; Shikasho, S.; Hiramatsu, K.: A comparison of techniques for hydrograph recession analysis, *Hydrological Processes*, 18, 403–413, 2004, <https://doi.org/10.1002/hyp.1247>
- [10] Toebes, C.; Morrissey, W.B.; Shorter, R.; Hendy, M.: Base-flow-recession curves, *Handbook of hydrological procedures: Procures No. 8*, Water and Soil Division, Ministry of Works for the National Water and Soil Conservation Organisation, Wellington, New Zealand, 1969.
- [11] Petraš, I.: An approach to the mathematical expression of recession curves, *Water SA*, Vol. 12., No.3., 1986.



DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.20>

RUBSUPAVE - MOGUĆNOST PRIMJENE RECIKLIRANE GUME U CEMENTOM STABILIZIRANIM NOSIVIM SLOJEVIMA KOLNIKA

RUBSUPAVE - POSSIBILITY OF USING RECYCLED RUBBER IN PAVEMENT CEMENT STABILIZED BEARING COURSES

Matija Zvonarić¹

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, mzvonaric@qfos.hr

Sažetak

Cementom stabilizirani nosivi slojevi u kolničkoj konstrukciji povećavaju nosivost, pružaju ravnu podlogu za asfaltne slojeve i sprječavaju ispumpavanje materijala prema gore. Unatoč pozitivnim karakteristikama ovoga sloja, postoje i negativni učinci. Prilikom stvrdnjavanja ovih mješavina, što je rezultat hidratacije cementa, dolazi do skupljanja materijala te se proizvode vlačna naprezanja. Kao posljedica nastaju pukotine koje se pod utjecajem vremenskih činitelja i dinamičkoga prometnog opterećenja šire i reflektiraju na asfaltne slojeve. Kako bi se spriječili ili smanjili negativni učinci, istražuje se primjena alternativnih materijala u ovim slojevima. U ovome radu predstavljen je projekt *RubSuPave* koji se provodi na Građevinskome i arhitektonskom fakultetu Osijek koji istražuje mogućnosti upotrebe reciklirane gume u cementom stabiliziranim nosivim slojevima kolnika. Cilj je projekta utvrditi utjecaj gume na pojavu reflektivnih pukotina u kolničkim konstrukcijama.

Ključne riječi: cementom stabilizirani nosivi slojevi, reciklirana guma, reflektivne pukotine, RubSuPave

Abstract

Cement bound base course in pavement increase its bearing capacity, provides flat surface for asphalt layers and prevent pumping material upwards. Despite all positive characteristics of this course, there are some negative effects. During hardening of the mixture, which is a result of cement hydration, material starts to shrink which induces tensile strains. As a result, cracks occurs and star to propagate under climatic conditions and dynamic traffic load. Those cracks reflect to asphalt layers. In order to prevent or minimize those negative effects, application of alternative materials is being investigated. In this paper, project *RubSuPave* which is carried out on Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek, is presented. Project is dealing with investigating the possibility of application of recycled rubber in pavement cement stabilized bearing courses. The objective of this project is to determine impact of recycled rubber on reflective crack occurrence in pavement.

Keywords: cement bound base courses, recycled rubber, reflective cracks, RubSuPave

1. Uvod

U cestama opterećenim srednje teškim, teškim i vrlo teškim prometnim opterećenjem uobičajena je primjena cementom stabiliziranih nosivih slojeva. Ovi slojevi povećavaju nosivost kolničke konstrukcije, osiguravaju dovoljnu ravnost za polaganje asfaltnih slojeva i onemogućavaju ispumpavanje materijala kroz više slojeve kolničke konstrukcije. Uobičajene su količine cementa u mješavinama ovih slojeva od 3 % do 8 %, ovisno o tipu agregata i traženoj nosivosti sloja. Kao posljedica hidratacije dolazi do skupljanja materijala čime nastaju vlažna naprezanja unutar stabiliziranoga sloja koja uzrokuju nastanak pukotina. Dinamička priroda prometnoga opterećenja izaziva posmična naprezanja na licima pukotina što dovodi do njihova širenja. Na širenje pukotina utječu i temperaturne razlike, osobito u područjima s niskim zimskim temperaturama, i vlažnost. U uvjetima niskih temperatura, osim pucanja veza cementne paste, zaostala voda u pukotinama smrzava se i time utječe na širenje pukotina. Kombinacijom navedenih utjecaja pukotine vrlo brzo propagiraju prema gore i dolaze do kontakta stabiliziranih slojeva s asfaltnim slojevima. Mjesto gdje se pukotina proširila do kontakta slojeva stabilizacijska mješavina više nije u mogućnosti preuzeti i prenijeti prometno opterećenje, nego se naprezanje akumulira u vrhovima pukotine. Posljedica toga je pucanje asfaltnoga sloja i tako nastalu pukotinu nazivamo reflektivnom pukotinom. Ove pukotine vrlo brzo napreduju do vozne površine asfalta i narušavaju udobnost i sigurnost vožnje. Fenomen reflektivnih pukotina dovodi do ubranoga propadanja kolničkoga zastora i povećanja troškova njegova održavanja. Unatoč problemu skupljanja, velika je korist upotrebe ovih mješavina u cestogradnji te je potrebno maksimalno smanjiti negativne pojave. Velik broj istraživača vidi rješenje ovoga problema u upotrebi alternativnih materijala u cementom stabiliziranim slojevima. Opsežno je istražena upotreba čelične zgure u stabilizacijskim mješavinama. Čelična zgura povećava tlačnu čvrstoću i dinamički modul elastičnosti u mješavinama sa šljunkom [1, 2]. U vapnenačkim agregatima dokazan je pozitivan učinak čelične zgure na proces skupljanja [3]. Kod razmatranja alternativnih materijala važno je da primjena tih materijala ima i ekonomski i ekološki učinak, a čelična zgura, kao nusproizvod proizvodnje čelika, zadovoljava oba aspekta. Nadalje, leteći je pepeo kao još jedan industrijski nusproizvod prilično zastupljen u istraživanjima. Zbog svojih pucolanskih svojstava leteći pepeo koristi se kao zamjena za vezivni materijal. Dokazano je kako cement može biti zamijenjen letećim pepelom do 25 % udjela. Leteći pepeo usporava hidrataciju čime bitno utječe na smanjenje skupljanja. Bez obzira na usporenje hidratacije, mješavina nakon dužega razdoblja postiže zadovoljavajući stupanj tlačne čvrstoće [4, 5]. Leteći pepeo u količinama < 15 % ima pozitivan učinak i na otpornost mješavina na utjecaj smrzavice [6]. Reciklirani asfalt nastao rekonstrukcijom kolnika također ima potencijal za ugradnju u stabilizirane nosive slojeve. Stabilizacijske mješavine s recikliranim asfaltom postižu veću duktilnost [7]. Udio recikliranoga asfalta koji se može koristiti u ovim slojevima seže do 70 % [7, 8], a dokazana je i mogućnost upotrebe ovoga materijala u kombinaciji s drugim otpadnim građevinskim materijalima [9]. S obzirom na rastući broj prijevoznih sredstava po glavi stanovnika, i u Europi i u svijetu, zbrinjavanje iskorištenih guma predstavlja sve veći problem. U ovome će se radu prikazati mogućnosti primjene reciklirane gume u stabilizacijskim mješavinama. Bit će predstavljen i projekt ispitivanja mogućnosti primjene gume u kolničkim konstrukcijama koji se provodi na Građevinskome i arhitektonskom fakultetu Osijek pod akronimom *RubSuPave*.

2. Primjena reciklirane gume u stabiliziranome nosivom sloju

Provedena su brojna istraživanja o mogućnostima primjene reciklirane gume u asfaltima proizvedenim po hladnome i toplome postupku, dok su istraživanja o mogućnostima primjene reciklirane gume u nosivim slojevima ograničena. Yadav i Tiwari [10] istražili su utjecaj gume u stabiliziranoj glini. Uočili su smanjenje čvrstoće što pripisuju slabijim vezama između čestica gume i gline. Kao pozitivne učinke ističu povećanje CBR-a za dodatak gume u količini od 2,5 % i povećanje duktilnosti mješavine. Arulrajah i suradnici [11] istražili su mogućnost primjene reciklirane gume u drobljenome kamenu. Dodatak gume od 2 % doveo je do smanjenja krutosti mješavine. Farhan i suradnici [12–15] proveli su opsežna istraživanja o mogućnostima primjene reciklirane gume u šljunkovitim materijalima u količinama od 15 %, 30 % i 45 %. U njihovim istraživanjima dodatak gume doveo je do pada čvrstoće, gustoće i krutosti [12]. Nadalje, dolazi do većega pada čvrstoće s dodatkom gume kod čvršćih mješavina, odnosno kod mješavina s većim udjelom cementa [13]. Prema tome autori preporučuju upotrebu gume u mješavinama s nižim udjelom cementa. U svome radu Farhan i suradnici [14] ističu prigušujući efekt gume prilikom zbijanja pomoću vibracija zbog čega dolazi do disipacije energije zbijanja. Nakon proučavanja odnosa naprezanja i deformacija autori zaključuju kako pukotine napreduju kroz čestice gume za koje se smatra da apsorbiraju energiju. Uočeno je i kako se pojavljuje manji broj velikih pukotina s većim brojem malih. Pham i suradnici [16, 17] istražili su utjecaj aditiva na stabilizacijske mješavine s gumom i zaključili kako aditivi ojačavaju veze između čestica gume i cementne paste te samim time povećavaju čvrstoću mješavine i otpornost mješavine na uvjete smrzavice. U zimskim uvjetima teže dolazi do pucanja unutarnjih veza.

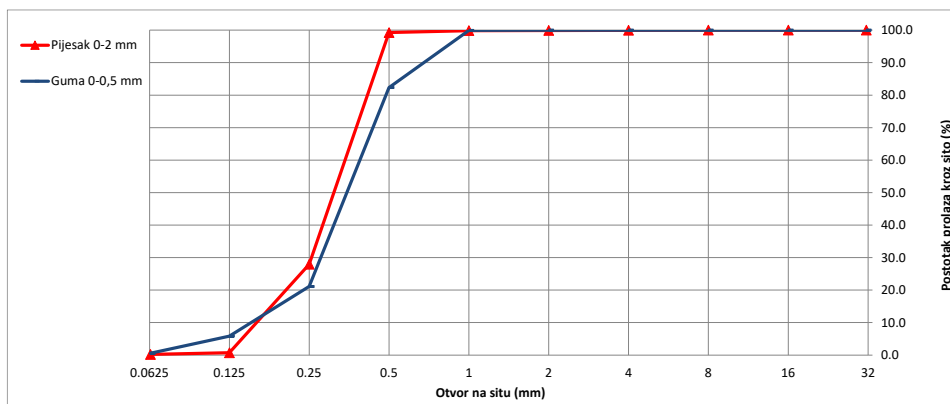
3. Projekt *RubSuPave*

Potaknuti mogućnošću primjene reciklirane gume u stabilizacijskim mješavinama i ekološkim aspektom zbrinjavanja sve većega broja iskorištenih guma na Građevinskome i arhitektonskom fakultetu Osijek, započela je provedba uspostavnoga istraživačkog projekta pod nazivom *Cementom stabilizirani nosivi slojevi s otpadnom gumom za održive kolnike* pod pokroviteljstvom Hrvatske zaklade za znanost. Primarni su ciljevi projekta izobrazba jednoga doktora znanosti, određivanje optimalnoga sastava stabilizacijske mješavine s dodatkom gume te analiza utjecaja reciklirane gume na pojavu reflektivnih pukotina u kolničkoj konstrukciji. Materijali koji će biti korišteni u istraživanju jesu tri frakcije separiranoga savskog šljunka, pijesak i granulirana guma frakcije 0 – 0,5 mm i gumene niti frakcije 0,8 – 3 mm. U sklopu projekta provest će se mehanička ispitivanja kao što su ispitivanje tlačne i indirektno vlačne čvrstoće nakon 7, 28 i 90 dana njege u klima-komori, ispitivanje dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti, ispitivanje tlačne čvrstoće pod utjecajem sredstva za odleđivanje (natrijev hidroksid) te ispitivanje sustava nevezanoga nosivog sloja, stabilizacijske mješavine i asfaltnoga sloja izloženih dinamičkomu opterećenju. Statički modul elastičnosti izračunat će se suvremenom tehnologijom digitalne stereofotogrametrije (Slika 1) uz pomoć stručnjaka iz toga područja. Uzorci se neće raditi uobičajenim postupkom u Proctorovome zbijaju, nego vibrirajućim čekićem što više odgovara uvjetima zbijanja nekoherentnih materijala na terenu. Primjenjivost ove metode dokazana je u radu [18].



Slika 1. Uređaj Aramis

Referentne mješavine sastoje se od 25 % volumnoga udjela svih prirodnih frakcija, dok će se u mješavinama s gumom pijesak mijenjati s gumenim granulatom u volumnim udjelima od 10 %, 20 %, 30 % i 40 %. Zamjena pijeska s gumom temelji se na sličnu granulometrijskom sastavu pijeska i gume (Slika 2).



Slika 2. Granulometrijska krivulja pijeska i gumenoga granulata

Na temelju iskustva odlučeno je kako će udjeli cementa u mješavinama iznositi 3 %, 5 % i 7 %. Također će biti ispitane i mješavine sa 7 % cementa i 2,5 % i 5 % dodanih gumenih niti. U mješavini koja se pokaže optimalnom, na temelju numeričke analize i optimizacije, bit će ispitan utjecaj aditiva za vezanje.

To čini ukupno 18 mješavina od kojih su 3 referentne, 14 s gumom i 1 s gumom i aditivom za vezanje. S odabranom mješavinom planira se izgradnja pokusne dionice u

posljednjoj godini projekta na kojoj će biti praćeni razvoji oštećenja pod utjecajem klimatskih činitelja i prometa. Sredstvima iz projekta laboratorij je opremljen novom klima-komorom s mogućnošću kontrole temperature i vlage te vibrirajućim čekićem s postoljem i odgovarajućim dodacima za zbijanje različitih uzoraka.

4. Zaključak

Primjena recikliranih materijala u cementom stabiliziranim nosivim slojevima predmet je mnogih istraživanja. Dokazane su prednosti primjene čelične zgre, letećega pepela i recikliranih građevinskih materijala. Područje primjene reciklirane gume još je relativno neistraženo. Dostupna istraživanja svjedoče o pozitivnome učinku gume na trajnost i duktilnost stabilizacijskih slojeva kao i o pozitivnome učinku gume u uvjetima smrzavice. U sklopu projekta *RubSuPave* istražiti će se utjecaj dviju različitih frakcija gume na cementom stabiliziranom nosivom sloju šljunka klasičnim ispitivanjem mehaničkih karakteristika uz pomoć suvremene tehnologije. Dodatno će se ispitati sustav nevezanoga nosivog sloja, stabilizacijskoga sloja i asfaltnoga sloja, koji su izloženi dinamičkomu opterećenju kako bi, što je moguće bliže, simulirali realne uvjete. Cilj je projekta utvrditi utjecaj reciklirane gume na skupljanje cementom stabiliziranih mješavina i njezin utjecaj na pojavu reflektivnih pukotina. Svi materijali koji će se koristiti dostupni su na našem tržištu, zbog čega je ovaj pristup izvođenja kolničkih konstrukcija primjenjiv na našim područjima.

Literatura

- [1] Barišić, I., Dimter, S., Rukavina, T.: Elastic properties of cement-stabilised mixes with steel slag, *International Journal of Pavement Engineering*, 17, 2015, (753–762), DOI <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1019496>.
- [2] Barišić, I., Marković, B., Zagvozda, M.: Freeze–thaw resistance assessment of cementbound steel slag aggregate for pavement structures, *International Journal of Pavement Engineering*, 20, 2017, (448–457), DOI <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1309192>.
- [3] Li, W., Lin, Z., Wang, Z. et al.: Characteristics of dry shrinkage and temperature shrinkage of cementstabilized steel slag, *Construction and Building Materials*, 134, 2017, (540–548), DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.214>.
- [4] Dimter, S., Rukavina, T., Dragčević, V.: Strength Properties of Fly Ash Stabilized Mixes, *Road Materials and Pavement Design*, 12, 2011, (687–697). DOI <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.11.005>.
- [5] Dimter, S., Rukavina, T., Minažek, K.: Estimation of elastic properties of fly-ash stabilized mixes using nondestructive evaluation methods, *Construction and Building Materials*, 102, 2016, (505–514). DOI <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.11.005>.
- [6] Zhang, Y., Johnson, A.E., White, D.J.: Freeze-thaw performance of cement and fly ash stabilized loess, *Transportation Geotechnics*, 21, 2019, DOI <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100279>.
- [7] Kasu, S.R., Manupati, K., Muppireddy, A.R.: Investigations on design and durability characteristics of cement treated reclaimed asphalt for base and subbase layers, *Construction and Building Materials*, 252, 2020, DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119102>.

- [8] Isola, M., Betti, G., Marradi, A. et al.: Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 2013, 48, (238–247), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.042>.
- [9] Tataranni, P., Sangiorgi, C., Simone, A. et al.: A laboratory and field study on 100% Recycled Cement Bound Mixture for base layers, *International Journal of Pavement and Technology*, 11, 2018, (427–434). DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.11.005>.
- [10] Yadav, J.S., Tiwari S.K.: Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement, *Applied Clay Science*, 149, 2017, (97–110). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.037>.
- [11] Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Maghool, F. et al.: Tyre derived aggregates and waste rock blends: Resilient moduli characteristics, *Construction and Building Materials*, 201, 2019, (207–217). DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.189>.
- [12] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H. et al.: Flexural characteristics of rubberized cement-stabilized crushed aggregate for pavement structure, *Materials and Design*, 88, 2015, (897–905), DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.071>.
- [13] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H.: Effect of cementation level on performance of rubberized cement-stabilized aggregate mixtures, *Materials and Design*, 97, 2016, (98–107), DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.059>.
- [14] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H.: Characterization of rubberized cement bound aggregate mixtures using indirect tensile testing and fractal analysis, *Construction and Building Materials*, 105, 2016, (94–102), DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.018>.
- [15] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H.: Compressive behaviour of rubberized cement-stabilized aggregate mixtures, *Construction and Building Materials*, 262, 2020, DOI [10.1016/j.conbuildmat.2020.120038](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120038).
- [16] Pham, N.-P., Toumi, A., Turatsinze, A.: Evaluating damage of rubberized cement-based composites under aggressive environments, *Construction and Building Materials*, 217, 2019, (234–241), DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.066>.
- [17] Pham, N.-P., Toumi, A., Turatsinze, A.: Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite, *Construction and Building Materials*, 207, 2019, (528–534), DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.147>.
- [18] Zvonarić, M., Barišić, I., Galić, M. et al: Influence of Laboratory Compaction Method on Compaction and Strength Characteristics of Unbound and Cement-Bound Mixtures, *Applied Sciences*, 11, 2021, DOI <https://doi.org/10.3390/app11114750>.

<https://zt2021.gf.sum.ba/>
zajednicki.temelji@gf.sum.ba

ISBN 978-953-8168-52-9
Zagreb, 2021.