

6. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 7.- 8. rujna 2020., Zagreb : zbornik radova

Žužul, Petra; Kovačević, Meho Saša; Hafner, Ivan; Kišiček, Tomislav; Perić, Romano; Kišiček, Tomislav; Kulić, Tin; Bekić, Damir; Lončar, Goran; Bačić, Mario; ...

Edited book / Urednička knjiga

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Publication year / Godina izdavanja: **2020**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:476434>

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2020>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



6. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

7. - 8. rujna 2020., Zagreb

Zbornik radova

Urednica:
NINA ŠTIRMER



Izdavač

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zagreb, Kačićeva 26

Urednica

Prof.dr.sc. Nina Štirmer

Dizajn naslovnice

minimum d.o.o.

Prijelom

Tanja Vrančić

Lektura

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

Tisak

Tiskara Zelina d.d., 2020.

Naklada

150 kom.

ISBN

ISBN: 978-953-8168-42-0

DOI

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2020>

Zagreb, rujan 2020.

CIP zapis

je dostupan u računalnome katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 001072222.

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

**6. SIMPOZIJ
DOKTORSKOG STUDIJA
GRAĐEVINARSTVA**

7.-8. rujna 2020., Zagreb

Zbornik radova

Urednica
Nina Štirmer

Organizacijski odbor simpozija

Prof.dr.sc.	Nina Štirmer	Prodekanica za znanost
Doc.dr.sc.	Mario Bačić	Zavod za geotehniku
Doc.dr.sc.	Ivan Halkijević	Zavod za hidrotehniku
Izv.prof.dr.sc.	Davor Skejić	Zavod za konstrukcije
Doc.dr.sc.	Dario Jukić	Zavod za matematiku
Prof.dr.sc.	Ivana Banjad Pečur	Zavod za materijale
Izv.prof.dr.sc.	Mladen Vukomanović	Zavod za organizaciju i ekonomiku građenja
Doc.dr.sc.	Ivo Haladin	Zavod za prometnice
Doc.dr.sc.	Ana Skender	Zavod za tehničku mehaniku
Izv.prof.dr.sc.	Silvio Bašić	Samostalna Katedra za zgradarstvo

Predgovor

Simpozij doktorskog studija na Građevinskom fakultetu utemeljen je 2015. godine s ciljem razvijanja istraživačkog rada, usvajanja znanstvene metodologije i kritičkog mišljenja doktoranada. Na simpoziju s prezentacijom rada u pravilu sudjeluju doktorandi 1. godine dok doktorandi 2. i 3. godine prate izlaganja i aktivno sudjeluju u raspravama. Doktorandi na simpoziju imaju mogućnost dobiti povratne informacije o svojim istraživačkim temama, postavljenim problemima i budućim izazovima pri izradi doktorskog rada. Mentori, odnosno studijski savjetnici sudjelovanjem na simpoziju usmjeravaju doktorande, savjetuju ih o mogućnostima provođenja teorijskih i eksperimentalnih istraživanja i mogućim znanstvenim doprinosima budućih doktorskih radova. Program doktorskoga studija zasniva se na provedbi kompetitivnih znanstvenih istraživanja, u sklopu nacionalnih i međunarodnih znanstvenih projekata koji uz znanstvene doprinose ujedno imaju i vrlo izraženu mogućnost primjene u praksi. Na dosadašnjih pet simpozija održano je 80 izlaganja doktoranada, a od 2015. godine do danas na Građevinskom fakultetu uspješno je obranjeno 36 doktorskih radova. Doktori znanosti, bez obzira gdje su zaposleni, svojim djelovanjem značajno pridonose razvoju gospodarstva. Oni otvaraju i razvijaju nova područja znanosti, utječu na razvoj društvene misli te pridonose tehnološkom razvoju.

Ovogodišnji Simpozij doktorskoga studija Građevinarstvo održava se u posebnim okolnostima tijekom trajanja pandemije COVID-19 i nakon potresa koji se dogodio u Zagrebu u ožujku 2020. godine i koji je ostavio velike posljedice na Zagreb i njegove stanovnike. Štete koje su nastale uslijed potresa i spoznaje o čimbenicima koji utječu na potresnu otpornost građevina potaknule su pojedine mlade istraživače na otvaranje novih pravaca istraživanja kojima će se baviti u svojim doktorskim radovima. Tu su dakako i radovi s drugim aktualnim istraživanjima vezano uz mogućnosti oblikovanja i optimizacije građevina primjenom novih materijala i sustava, kao i radovi koji se bave razvojem metoda i poboljšanjem pouzdanosti mjerenja na osnovi velikog broja eksperimentalnih podataka. Na ovom će simpoziju biti prezentirano 18 radova doktoranada iz gotovo svih istraživačkih grana, a jedna će sekcija biti posvećena iskustvima s dodatnog obrazovanja i usavršavanja zaposlenika Građevinskog fakulteta na međunarodnim institucijama u proteklih godinu dana. Također, doktorandima će biti predstavljena mogućnost izrade doktorata prema tzv. skandinavskom modelu koji se zasniva na skupu objavljenih znanstvenih radova koji daju zaokruženu cjelinu.

Organizacijski odbor simpozija zahvaljuje svim autorima i recenzentima koji su doprinijeli poboljšanju kvalitete radova te omogućili održavanje 6. Simpozija doktorskog studija Građevinarstva. Nadamo se da će doktorandi sudjelovanjem na

simpoziju dobiti nove ideje i smjernice za provođenje svojih istraživanja te usvojiti nova i unaprijediti postojeća znanja potrebna za uspješni završetak doktorskoga studija.

Zagreb, 24. kolovoza 2020.

Urednica



Prof.dr.sc. **Nina Štirmer**

Sadržaj

Predgovor	5
Razvoj korelacije za procjenu maksimalne krutosti tla pomoću statičkog penetracijskog pokusa (CPT) Petra Žužul, prof. dr. sc. Meho Saša Kovačević	9
Procjena stanja postojećih zidanih konstrukcija: Pregled metoda Ivan Hafner, prof. dr. sc. Tomislav Kišiček	21
Standardiziranje usluga upravljanja projektima gradnje investitorima obveznicima javne nabave u Republici Hrvatskoj Romano Perić, izv. prof. dr. sc. Mladen Vukomanović	33
Model strujanja mora i pronosa mikroorganizama u lukama Tin Kulić, doc. dr. sc. Damir Bekić, prof. dr. sc. Goran Lončar	47
Procjena amplifikacije seizmičke pobude za slučaj potresa u Albaniji 26. studenoga 2019. Adrian Kadiri, doc. dr. sc. Mario Bačić	61
FRP pješački mostovi – mogućnosti oblikovanja i optimizacije Lucija Stepinac, doc. dr. sc. Ana Skender, izv. prof. dr. sc. Josip Galić, izv. prof. dr. sc. Domagoj Damjanović	73
Morfodinamika i održivost nasipane šljunčane plaže – primjer plaže Ploče u Rijeci Filip Kalinić, prof. dr. sc. Goran Lončar	85
Smjernice za definiranje hidrograma velikih voda Josip Husajina, doc. dr. sc. Damir Bekić	97
Review on concrete under combined environmental actions and possibilities for application to alkali activated materials Ashfaque Ahmed Jhatial, Asst. Prof. Marijana Serdar, Assoc. Prof. Guang Ye	109
Pregled metoda poboljšanja numeričkih modela primjenom rezultata eksperimentalnih istraživanja u dinamičkoj analizi konstrukcija Suzana Ereiz, doc. dr. sc. Ivan Duvnjak	123
Developing high-performance concrete using locally available materials Kiran Ram, Asst. Prof. Marijana Serdar, Diana Londono-Zuluaga, PhD, Prof. Karen L Scrivener	139
Application of thermogravimetric analysis for characterization of clay as supplementary cementitious material Matea Flegar, Asst. Prof. Marijana Serdar, Diana Londono-Zuluaga, PhD, Prof. Karen Scrivener	153

Ocjenjivanje seizmičke oštjetljivosti postojećih mostova pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja Gordana Hrelja Kovačević, prof. dr. sc. Ana Mandić Ivanković	163
Flexural cracks in fibre-reinforced concrete beams with fibre-reinforced polymer reinforcing bars Enes Krasniqi, Assoc. Prof. Domagoj Damjanović, Prof. Naser Kabashi	175
Corrosion potential of steel embedded in alkali-activated slag Antonino Runci, Asst. Prof. Marijana Serdar	189
Condition assessment of concrete structures using ground penetrating radar (GPR) Ksenija Tešić, Asst. Prof. Ana Baričević, Asst. Prof. Marijana Serdar	197
Cost-optimal thermal transmittance and energy performance of residential buildings in various cities in Kosovo Arta Sylejmani, Asst. Prof. Bojan Milovanovic	209
Potential of red mud as raw material for alternative binders in concrete Ivana Vladić Kancir, Asst. Prof. Marijana Serdar	221
Dodatna obrazovanja i usavršavanja	233
Pozvana predavanja	237
Sažeci obranjenih doktorskih radova: rujan 2019. - srpanj 2020	241

Razvoj korelacije za procjenu maksimalne krutosti tla pomoću statičkog penetracijskog pokusa (CPT)

Petra Žužul¹, prof. dr. sc. Meho Saša Kovačević²

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

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

Sažetak

Maksimalna krutost tla se u geotehnici najčešće izražava modulom smicanja kao odnos između posmičnog naprezanja i male relativne posmične deformacije. Za određivanje maksimalne krutosti tla najpogodnije su geofizičke metode kojima se mjere brzine širenja posmičnih valova. U radu je prikazan razvoj korelacije između maksimalne krutosti tla, dobivene višekanalnom analizom površinskih valova (MASW) i rezultata statičkog penetracijskog pokusa (CPT). Korelacija je razvijena na temelju baze od 128 parova podataka na lokaciji za ispitivanje nosivosti pilota u Nizozemskoj.

Ključne riječi: CPT, geofizičke metode, maksimalna krutost tla, korelacija, neuronske mreže

Development of correlation for estimating maximum soil stiffness via cone penetration test (CPT)

Abstract

Maximum soil stiffness is most often expressed in geotechnics through shear modulus, as a relationship between shear stress and small relative shear deformation. Geophysical methods for measuring propagation of shear wave velocities are the most suitable for determining maximum soil stiffness. The paper presents development of correlation between the maximum soil stiffness, obtained by multichannel surface waves analysis (MASW), and cone penetration test (CPT) results. The correlation was developed based on a database of 128 data pairs at a pile capacity test site in the Netherlands.

Key words: CPT, geophysical methods, maximum soil stiffness, correlation, neural networks

1 Uvod

Određivanje krutosti tla kao odnosa naprezanja i deformacija u tlu predstavlja jednu od najvažnijih inženjerskih aktivnosti prilikom provođenja numeričkih analiza u mehanici tla. O pouzdanosti određivanja krutosti tla ovisi i pouzdanost predviđanja deformacija geotehničkih konstrukcija i tla. Proračun deformacija tla provodi se korištenjem konstitucijskih modela tla koji uzimajući u obzir činjenicu da se posmična krutost tla nelinearno smanjuje u području od malih deformacija do sloma tla. Praksa je pokazala da je procjena deformacija tla često nepouzdana i nedostatna za racionalno projektiranje građevinskih konstrukcija ili pak da zahtijeva primjenu skupih i složenih mjernih i računskih postupaka. U posljednje vrijeme pouzdanost predviđanja deformacija u tlu mijenja se nabolje iz više razloga. Među najvažnijim je razvoj potpuno novih mjernih postupaka, koji su omogućili znatno bolje razumijevanje mehaničkog ponašanja tla, te razvoj računskih strojeva, koji danas brzo obavljaju složene proračune nužne pri analizi deformacija tla [1].

U konstitucijskim modelima tla važnu ulogu ima maksimalna krutost tla, izražena modulom posmika pri malim deformacijama (G_0). Pod malim deformacijama razumijevaju se one do kojih je modul smicanja tla najveći i približno konstantan ($G = G_0$). Za mjerenje maksimalne posmične krutosti tla pri malim deformacijama najpogodnije su geofizičke metode. One se temelje na mjerenju brzine širenja posmičnih valova (v_s), malih amplituda, koje u tlu izazivaju i male posmične deformacije. Modul smicanja računa se na temelju poznate gustoće tla (ρ_0), prema izrazu:

$$G_0 = \rho_0 \cdot v_s^2 \quad (1)$$

Ubrzani razvoj tehnologije dovodi do sve veće primjene terenskih geofizičkih metoda. One omogućavaju dobivanje kontinuiranih podataka o tlu po dubini. Metode su nedestruktivne, jer za njihovu primjenu nije potrebno provoditi skupa bušenja i vađenje neporemećenih uzoraka. Geofizičkim metodama se određuju prosječne brzine posmičnih valova za veće volumene tla nego što je moguće ispitivanje na ograničenom broju uzoraka u laboratoriju. Mjerenja su pouzdana jer se izbjegava poremećenje tla uslijed bušenja, vađenja uzoraka te ugradnje uzoraka u laboratorijske uređaje. Metode rješavaju neke od temeljnih problema površinske refrakcije jer mogu detektirati i izmjeriti krutost mekših slojeva koji se nalaze ispod krućih slojeva [2].

Najraširenije geofizičke metode za određivanje brzina širenja posmičnih valova su one koje se zasnivaju na analizi površinskih valova: kontinuirana analiza površinskih valova (Continuous Surface Wave, CSW), spektralna analiza površinskih valova (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW) i višekanalna analiza površinskih valova (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW). Metode se zasnivaju na dis-

perzivnim karakteristikama Rayleighevih valova, uzimajući u obzir činjenicu da se površinski Rayleighevi valovi različitih valnih duljina, odnosno frekvencija, šire do različitih dubina. Tako se valovi niže frekvencije, pa prema tome veće valne duljine, šire dublje u medij nego valovi visoke frekvencije, odnosno male valne duljine. U uslojenom mediju brzina širenja vala na površini ovisi o frekvenciji, odnosno valnoj duljini vala. Ta promjena brzine širenja vala na površini s valnom duljinom naziva se disperzija vala i u uskoj je povezanosti s krutosnim karakteristikama uslojenog medija kroz koji val prolazi. Krivulja disperzije predstavlja ovisnost brzine vala na površini i valne duljine odnosno frekvencije. Za uslojeni medij u kome krutost varira s dubinom, potreban je proces inverzije da bi se iz mjerene krivulje disperzije dobio profil brzina širenja posmičnih valova po dubini. Postupak se odvija tako da se najprije za pretpostavljeni profil brzina izračuna teoretska krivulja disperzije koja se zatim uspoređi s izmjenom krivuljom disperzije. Zbog nepoklapanja tih krivulja, postupak se ponavlja mijenjajući debljine te krutosne karakteristike pretpostavljenog profila. Kada se teoretska i izmjerena krivulja disperzije poklope s inženjerski zadovoljavajućom točnošću, pretpostavljeni profil smatra se rješenjem [3].

Za određivanje krutosti tla u području od malih deformacija do sloma potrebno je primijeniti nekoliko različitih laboratorijskih i terenskih tehnologija, ovisno o veličini deformacija koje se želi mjeriti. Za mjerenje posmične krutosti tla pri malim deformacijama najpogodnije su geofizičke metode. Za područje srednjih deformacija razvijeno je nekoliko različitih laboratorijskih uređaja koji se montiraju na površinu uzorka tla, prije svega pri troosnom pokusu. Krutost tla pri velikim deformacijama mjeri se uobičajenim laboratorijskim pokusima kao što su edometar ili standardni troosni pokus. Vrlo uspješnu alternativu laboratorijskim pokusima za kontinuirano mjerenje krutosti tla pri malim i srednjim deformacijama predstavlja terenski statički penetracijski pokus CPT.

Statički penetracijski pokus je jednostavan, brz i ekonomičan pokus koji omogućuje dobivanje kontinuiranih podataka o tlu po dubini. Princip izvođenja statičkog penetracijskog pokusa ogleda se u utiskivanju posebne sonde u tlo određenom brzinom, uz konstantno mjerenje otpora utiskivanju na šiljku sonde (q_c), trenja na plaštu sonde (f_s) koje se aktivira prilikom utiskivanja sonde između plašta i okolnog tla te pornog tlaka (u_2). Iako je CPT ograničen ponajprije na mekana tla, sa suvremenom, većom opremom za bušenje i s čvršćim šiljcima na sondama, CPT se može primijeniti u krutim i vrlo krutim tlima, a u nekim slučajevima i u mekim stijenama. Oprema za provođenje CPT pokusa uključuje CPT sondu, opremu za potiskivanje te sustav za prikupljanje podataka. Osnovna primjena CPT-a u geotehnici uključuje: snimanje profila tla i identifikaciju pojedinih slojeva tla, određivanje mehaničkih karakteristika tla, određivanje parametara tečenja i konsolidacije tla te indicaciju osjetljivosti tla na likvefakciju. Prednosti CPT pokusa su: brzo i kontinuirano mjerenje, ponovljivost i pouzdanost mjerenja, ekonomičnost i produktivnost te jake teoretske osnove

za interpretaciju. U posljednje vrijeme provedena su opsežna istraživanja, posebno u inženjerstvu okoliša, koja su dovela do razvoja nove, vrlo sofisticirane opreme za penetracijska ispitivanja. U klasičnu sondu za penetracijska ispitivanja ugrađuju se različite vrste senzora kao što su: laseri, optički senzori, GPR antene visoke rezolucije te integrirani optoelektronički i kemijski senzori [4].

Do sada je CPT pokus uspješno korišten za određivanje krutosti tla pri srednjim i velikim deformacijama, sve do sloma tla. Povezivanjem brzine širenja valova, izmjerene geofizičkim metodama, s rezultatima CPT pokusa omogućilo bi se dobivanje maksimalne krutosti tla pri malim deformacijama. Na taj bi način CPT zamijenio nekoliko različitih laboratorijskih i terenskih tehnologija koje se danas primjenjuju za određivanje krutosti tla u području malih deformacija do sloma.

2 Postojeće korelacije između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa

Razvojem korelacija između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa istraživači širom svijeta se bave već približno 40 godina [5-11]. Osim izmjerenih vrijednosti otpora utiskivanju na šiljku sonde (q_c), trenja na plaštu sonde (f_s) i pornog tlaka (u_2), publicirane korelacije uključuju početno stanje naprezanja i geološku starost tla. Iako su neke korelacije obuhvaćale lokacije u različitim dijelovima svijeta, ne mogu se, bez odgovarajuće verifikacije, primijeniti na druge lokacije. Neke od najčešće citiranih korelacija opisane su u nastavku.

Andrus i dr. [5] su na temelju baze od 229 parova podataka na području SAD-a i Japana razvili korelaciju koja uključuje korigirani otpor utiskivanju na šiljku sonde (q_t u kPa), indeks tipa ponašanja tla (I_c), dubinu ispitivanja (d u m) i faktor starosti tla (SF^a):

$$v_s = 2.62 \cdot q_t^{0.395} \cdot I_c^{0.912} \cdot d^{0.124} \cdot SF^a \quad (2)$$

Korigirani otpor utiskivanju na šiljku sonde (q_t) računa se prema izrazu:

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (3)$$

gdje je a – koeficijent neto površine šiljka dobiven kalibracijom u laboratoriju (0,70-0,85).

Indeks tipa ponašanja tla (I_c) računa se prema izrazu:

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2} \quad (4)$$

gdje su Q_{tn} i F_r normalizirani otpor na šiljku i normalizirani koeficijent trenja koji se izračunavaju prema izrazima:

$$Q_{tn} = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (5)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdje su:

σ_{vo} - vertikalno ukupno naprezanje u tlu,

σ'_{vo} - vertikalno efektivno naprezanje u tlu,

p_a - atmosferski tlak (100 kPa) i

n - eksponent naprezanja ovisan o tipu tla i veličini naprezanja koji može imati vrijednost između 0 i 1 i koji se izračunava prema izrazu:

$$n = 0,381 \cdot I_c + 0,05 \cdot \left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) - 0,15 \quad (7)$$

Faktor starosti tla (SF^a) iznosi 0,92 za tla holocenske starosti i 1,12 za tla pleistocenske starosti.

Hegazy i Mayne [6] su na temelju baze od 558 parova podataka na području SAD-a, Japana i Italije razvili korelaciju koja uključuje normalizirani otpor utiskivanju na šiljku sonde (Q_{tn}), indeks tipa ponašanja tla (I_c), vertikalno efektivno naprezanje u tlu (σ'_{vo} u kPa) i atmosferski tlak (p_a u kPa):

$$v_s = 0,0831 \cdot Q_{tn} \cdot e^{1,786 I_c} \cdot \left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right)^{0,25} \quad (8)$$

Robertson [7] je na temelju baze od 1035 parova podataka na području USA razvio korelaciju koja uključuje korigirani otpor utiskivanju na šiljku sonde (q_t u kPa), indeks tipa ponašanja tla (I_c), vertikalno ukupno naprezanje u tlu (σ_{vo} u kPa) i atmosferski tlak (p_a u kPa):

$$v_s = \left[10^{0,55 I_c + 1,68} \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{p_a} \right) \right]^{0,5} \quad (9)$$

McGann i dr. [8] su na temelju baze od 513 parova podataka na području Novog Zelanda razvili korelaciju koja uključuje otpor na šiljku sonde (q_c u kPa), trenje na plaštu sonde (f_s u kPa) i dubinu ispitivanja (d u m):

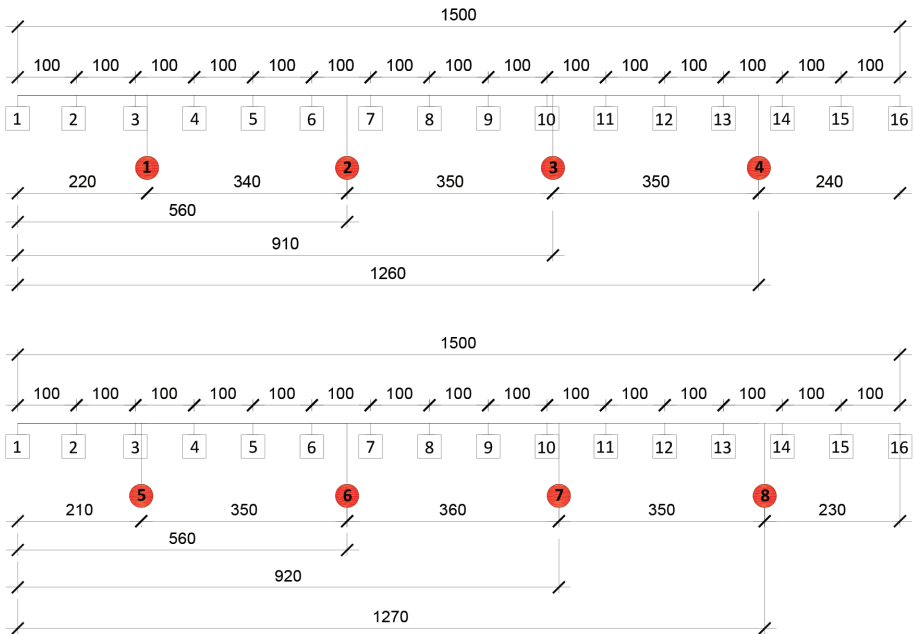
$$v_s = 18,4 \cdot q_c^{0,144} \cdot f_s^{0,0832} \cdot d^{0,278} \quad (10)$$

Za razvoj korelacije koja se predlaže u ovom radu, korišteni su isti parametri i isti oblik ovisnosti brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa kao u izrazu (10). Razlog za to leži u činjenici da su q_c (ili q_t), f_s i d izravno mjerene i neovisne veličine odnosno rezultati CPT pokusa, dok se pomoću njih izračunavaju I_c , Q_{tn} , σ'_{vo} i σ_{vo} , za koje je još dodatno potrebno pretpostaviti (ili izmjeriti na neki drugi način) jediničnu težinu tla (γ) i in situ porni tlak (u_o). Te pretpostavke unose dodatne pogreške ili nesigurnosti u procijenjene vrijednosti brzine širenja posmičnih valova, pa posredno i na maksimalnu krutost tla.

3 Prikaz provedenih terenskih ispitivanja

Istražni radovi, korišteni za potrebe razvoja korelacije između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa, izvedeni su za potrebe interpretacije nosivosti serije pilota izvedenih u općini Beemster u sjevernoj Nizozemskoj, koja je dio prometne regije Amsterdama. S obzirom na to da je tlo sastavljeno od slabo nosive gline, prije provedbe ispitivanja, gornja četiri metra glinovitog tla su zamijenjena zbijenim pijeskom. Na pozicijama budućih pilota na kojima će se ispitivati nosivost izvedeno je 8 CPT pokusa do dubine od 8 metara. Uzdužni razmak CPT pozicija ispitivanja iznosio je oko 3,5 m, a poprečni razmak oko 7 m. U neposrednoj blizini pozicija CPT pokusa izvedena su dva geofizička profila na kojima su metodom višekanalne analize površinskih valova (MASW) provedena dva profila duljine 15 m, s međurazmakom geofona od 1 m. Pozicije CPT pokusa i pozicije geofona su prikazane na slici 1. CPT pokus izvela je tvrtka Multiconsult, Vestiging Amsterdam, a geofizička ispitivanja je izveo Zavod za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Na slici 2. je prikazan detalj provedbe geofizičkih ispitivanja na profilu 1. Interpretacija rezultata ispitivanja brzine širenja valova napravljena je na svakih pola metara dubine, čime je na jednoj poziciji CPT pokusa dobiveno 16 rezultata ispitivanja. Pošto je ukupno izvedeno 8 CPT pokusa, stvorena je baza s ukupno 128 parova podataka. Rezultati CPT i MASW ispitivanja su prikazani na slici 3.

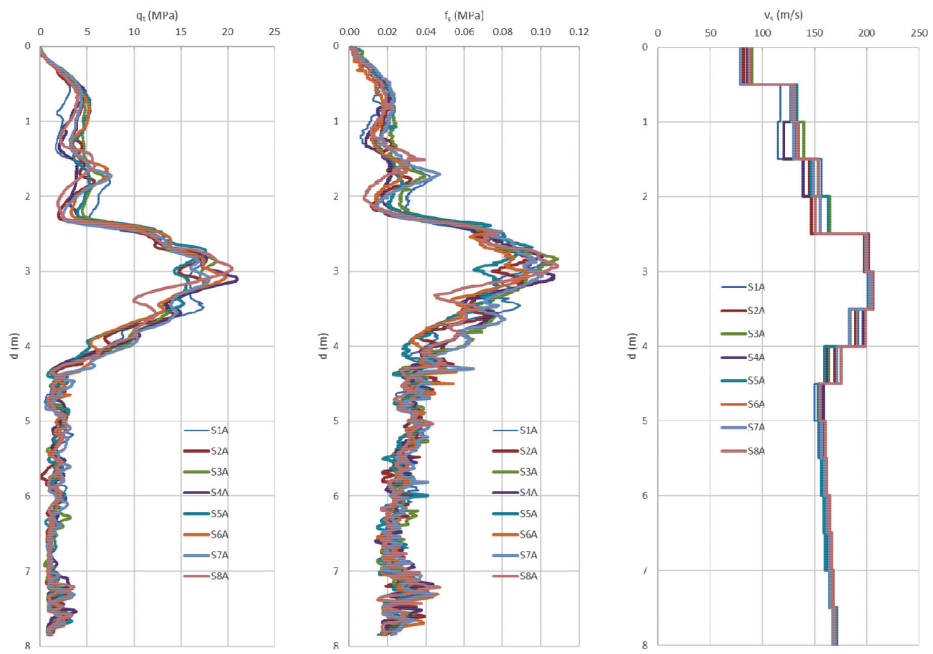
Razvoj korelacije za procjenu maksimalne krutosti tla pomoću statičkog penetracijskog pokusa (CPT)



Slika 1. Pozicije i raspored CPT i MASW ispitivanja



Slika 2. Detalj provedbe MASW ispitivanja



Slika 3. Rezultati CPT i MASW ispitivanja

4 Nova korelacija između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa

Regresijski model koji će se razviti u ovom radu ima oblik izraza (10), s tom razlikom što će se umjesto otpora utiskivanju na šiljku (q_c) koristiti korigirani otpor utiskivanju na šiljku (q_t):

$$v_s = c_0 \cdot q_t^{c_1} \cdot f_s^{c_2} \cdot d^{c_3} \quad (11)$$

gdje su c_0 , c_1 , c_2 i c_3 , parametri regresijskog modela.

Logaritmiranjem lijeve i desne strane izraza (11) transformira se postavljeni regresijski model:

$$\log v_s = \log c_0 + c_1 \cdot \log q_t + c_2 \cdot \log f_s + c_3 \cdot \log d \quad (12)$$

Tako transformirani regresijski model predstavlja linearni regresijski model koji se može pisati kao:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 \quad (13)$$

gdje je: $y = \log v_s$, $a_0 = \log c_0$, $a_1 = c_1$, $a_2 = c_2$, $a_3 = c_3$, $x_1 = \log q_t$, $x_2 = \log f_s$ i $x_3 = \log d$

Za (n) izmjerenih podataka parametri transformiranog regresijskog modela a_0 , a_1 , a_2 i a_3 mogu se odrediti metodom najmanjih kvadrata minimiziranjem sume kvadrata odstupanja izmjerenih od regresijskih vrijednosti:

$$\min \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3)]^2 \quad (14)$$

U izrazu (14) parametri a_0 , a_1 , a_2 i a_3 su nepoznanice. Deriviranje izraza (14) po svakom od navedenih parametara rezultira sustavom od četiri algebarske jednadžbe s četiri nepoznanice. Njihovim rješavanjem dobivaju se traženi parametri transformiranog regresijskog modela: $a_0 = 1,59954$, $a_1 = 0,12445$, $a_2 = 0,04795$, $a_3 = 0,17979$. S obzirom na to da je $a_0 = \log c_0$, slijedi da je $c_0 = 10^{a_0} = 39,769$, $c_1 = a_1 = 0,124$, $c_2 = a_2 = 0,048$ i $c_3 = a_3 = 0,180$.

Nova korelacija između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa je:

$$v_s = 39,769 \cdot q_t^{0,124} \cdot f_s^{0,048} \cdot d^{0,180} \quad (15)$$

Ako se s $v_{s\text{-mjereno}}$ označe rezultati mjerenja brzine širenja posmičnih valova MASW metodom, a s $v_{s\text{-prognozirano}}$ označi brzina širenja posmičnih valova dobivena na temelju rezultata CPT pokusa pomoću izraza (15), može se ocijeniti reprezentativnost regresijskog modela. Za to je najprije potrebno izračunati prosječnu vrijednost izmjerenih brzina posmičnih valova ($v_{s\text{-prosijek}}$):

$$v_{s\text{-prosijek}} = \frac{\sum_{j=1}^{128} v_{s\text{-mjereno}_j}}{128} = 158,92 \quad (16)$$

Suma kvadrata odstupanja prognoziranih brzina širenja posmičnih valova od prosječne vrijednosti izmjerenih brzina posmičnih valova (SP) iznosi:

$$SP = \sum_{i=1}^{128} (v_{s\text{-prognozirano}_i} - v_{s\text{-prosijek}})^2 = 0,951 \quad (17)$$

Suma kvadrata odstupanja izmjerenih brzina širenja posmičnih valova od prosječne vrijednosti izmjerenih brzina posmičnih valova (SM) iznosi:

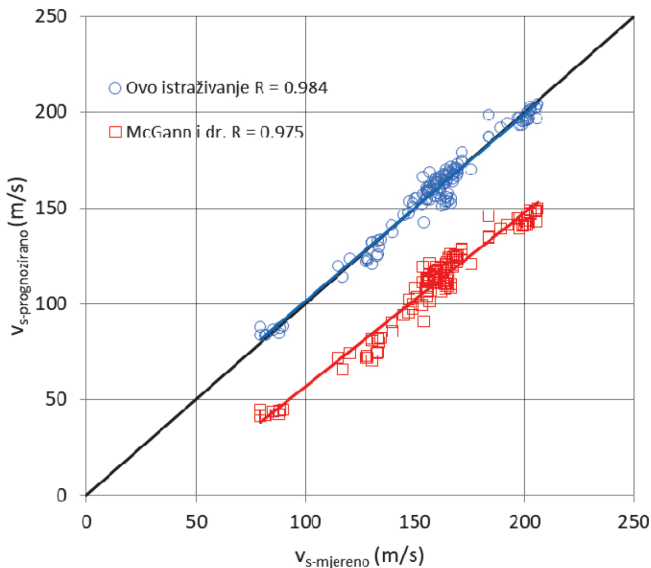
$$SM = \sum_{i=1}^{128} (v_{s\text{-mjereno}_i} - v_{s\text{-prosjeak}})^2 = 0,978 \quad (18)$$

Pokazatelj reprezentativnosti regresijskog modela je koeficijent determinacije (R^2) koji upućuje na to koliko je posto sume kvadrata odstupanja vrijednosti prognozirane brzine širenja posmičnih valova protumačeno regresijskim modelom:

$$R^2 = \frac{SP}{SM} = 0,972 \quad (19)$$

Visoka vrijednost koeficijenta determinacije ($0 \leq R^2 \leq 1$) potvrđuje reprezentativnost regresijskog modela.

Na slici 4. prikazana je usporedba primjene nove korelacije (izraz 15) i korelacije koju su objavili McGann i dr. [8] (izraz 10) na bazu podataka korištenu u ovom istraživanju.



Slika 4. Usporedba nove McGann i druge korelacije

Objekcije korelacije imaju vrlo visoke koeficijente determinacije kada se primijene na bazu podataka dobivenu za vrijeme ispitivanja nosivosti pilota u sjevernoj Nizozemskoj. Međutim, kao što se može vidjeti na slici 4, izraz McGannov i drugih [8] značajno podcjenjuje brzinu širenja posmičnih valova, ali relativno dobro opisuje trend relativnog povećanja brzina. To opravdava potrebu razvoja lokalnih korelacija. Nedostatak predložene korelacije je u tome što je razvijena na malom prostoru (150 m²). Za njenu primjenu u praksi trebalo bi zahvatiti znatno šire područje istraživanja.

5 Zaključak

Krutost tla se u geotehnici najčešće izražava modulom smicanja G kao odnosa između posmičnog naprezanja τ i relativne posmične deformacije γ . Modul smicanja je nužan parametar za svaku numeričku analizu i prognozu deformacija geotehničkih konstrukcija. Krutost tla se nelinearno smanjuje od malih deformacija, gdje je maksimalna, do sloma. Za mjerenje maksimalne posmične krutosti tla pri malim deformacijama najpogodnije su geofizičke metode koje se temelje na mjerenju brzine širenja posmičnih valova v_s , malih amplituda, koje u tlu izazivaju i male posmične deformacije. Za određivanje maksimalne krutosti tla pri malim deformacijama može se umjesto geofizičkih metoda koristiti terenski statički penetracijski pokus CPT, koji se najčešće primjenjuje u geotehničkoj praksi za kontinuirano određivanje mehaničkih karakteristika tla po dubini. U radu su korišteni rezultati terenskih istražnih radova izvedeni za potrebe interpretacije nosivosti serije pilota izvedenih u sjevernoj Nizozemskoj. Razvijena je korelacija između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa. Usporedba s publiciranim korelacijama je pokazala opravdanost razvoja lokalnih korelacija.

Literatura

- [1] Kovačević, M.S., Bačić, M., Jurić Kačunić, D., Ivoš, G.: Some Innovative Technologies and Techniques in Geotechnical Engineering, Engineering power 13 (2018) 3, pp. 2-10.
- [2] Kovačević, M.S., Marčić, D., Gazdek, M.: Application of geophysical investigations in underground engineering, Tehnički vjesnik, 20 (2013) 6, pp. 1111-1117.
- [3] Kovačević, M.S., Bačić, M., Librić, L.: Potencijali primjene nerazornih metoda ispitivanja tla i stijene za potrebe sanacije strateških infrastrukturnih linijskih objekata, Stanje i budućnost tehničkih znanosti u Hrvatskoj u 21. stoljeću. Zagreb, pp. 141-156, 2017.
- [4] Librić, L., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M.S.: Primjena rezultata statičkog penetracijskog pokusa za klasifikaciju tla, GRAĐEVINAR, 69 (2017) 1, pp. 11-20.
- [5] Andrus, R., Mohanan, N., Piratheepan, P., Ellis, B., Holzer, T.: Predicting shear-wave velocity from cone penetration resistance, Proceedings of the fourth international conference on earthquake geotechnical engineering, Thessaloniki, Paper no.1454, 2007.
- [6] Hegazy, Y., Mayne, P.: A global statistical correlation between shear wave velocity and cone penetration resistance, Proceedings of the GeoShanghai, site and geomaterial characterization (GSP 149), Reston, pp. 243-248.
- [7] Robertson, P.: Interpretation of cone penetration tests - a unified approach. Canadian Geotechnical Journal 46 (2009) 11, pp. 1337-1355.

- [8] McGann, C.R., Bradley, B.A., Taylor, M. L., Wotherspoon, L.M., Cubrinovski, M.: Applicability of existing empirical shear wave velocity correlations to seismic cone penetration test data in Christchurch, New Zealand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75 (2015) pp. 76-86.
- [9] Sykora, D., Stokoe II, K.: Correlations of in-situ measurements in sands and shear wave velocity. Geotechnical engineering report GR83-33, The University of Texas at Austin, 1983.
- [10] Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D.: Modulus of sands from CPTs and DMTs., *Proceedings of the 12th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Rio de Janeiro, pp. 165-170, 1989.
- [11] Mayne, P., Rix, G.: G_{max} – V_s relationships for clays, *Geotechnical Testing Journal*, 16 (1993) 1, pp. 54-60.

Procjena stanja postojećih zidanih konstrukcija: Pregled metoda

Ivan Hafner¹, prof. dr. sc. Tomislav Kišiček²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, ivan.hafner@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, tomlav.kisicek@grad.unizg.hr

Sažetak

U Hrvatskoj, a i u čitavoj Europi, opeka i kamen jedan su od najčešće korištenih građevnih materijala. Ako se tome pridoda da su uglavnom građevine s najvećom kulturnom i povijesnom vrijednošću upravo zidane konstrukcije, metode procjene stanja zidanih građevina su iznimno važne. U ovome radu prikazano je trenutačno stanje u području procjene stanja zidanih konstrukcija s posebnim naglaskom na one metode za koje se smatra da se mogu izvesti na najbrži i najjednostavniji način sa željom da se dobije kvalitetan prikaz najvažnijih svojstava materijala te čitavog stanja zidane konstrukcije.

Ključne riječi: metode procjene stanja, zidane konstrukcije, čvrstoća materijala, nosivost, kulturna baština

Assessment of existing masonry structures: State of the art

Abstract

In Croatia and throughout Europe, stone and brick masonry rank among the most commonly used building materials. Considering that most of the buildings of cultural or historical significance are masonry structures, the assessment methods for masonry buildings are of extreme importance. An overview of currently available assessment methods for masonry structures is given in this paper. The main focus is on the methods that have proven to be the fastest and easiest to apply, the intention being to provide a quality insight into the most important material characteristics and condition of masonry structures.

Key words: assessment methods, masonry structures, strength of material, load bearing capacity, cultural heritage

1 Uvod

U građevinarstvu su opeka i kamen među prvim materijalima koji su ikada korišteni. Danas, zidane konstrukcije se i dalje grade radi svojih prednosti poput vatrootpornosti, zvučne i toplinske izolacije te ekonomskih aspekata. Stoga ne čudi podatak da je 70 % građevina na svijetu izvedeno kao zidane konstrukcije [1]. Slična procjena vrijedi i za Hrvatsku. U Hrvatskoj je nažalost velika većina takvih građevina izvedena prije razvitka potresnih normi (1960-tih) te su to uglavnom građevine bez ikakvih pojačanja i betonskih elemenata u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Naravno, detaljna potresna procjena stanja te rekonstrukcija potrebne su za gotovo sve takve građevine, na što je upozorio i potres u Zagrebu u ožujku ove godine. Uz to, kao što je već napomenuto, velik broj takvih zgrada u Hrvatskoj (npr. Zagreb, Split, Dubrovnik) građevine su s velikom kulturnom i povijesnom vrijednošću što je dodatni razlog zašto procjena stanja i pojačavanje zidanih konstrukcija moraju biti provedeni na vrlo visokoj razini. Problematika također leži u činjenici da su u prošlom desetljeću velika financijska sredstva izdvojena s ciljem energetske obnove takvih građevina bez pridavanja prevelike pozornosti potresnim procjenama i pojačanjima [2]. S obzirom na to da su oštećenja od potresa identificirana i na zgradama na kojima je provedena energetska obnova, kako u Hrvatskoj tako i u državama Europske unije [2], jasno je da procjena stanja te potresna rekonstrukcija moraju biti na vrhu liste prioriteta kada se govori o rekonstrukciji zidanih konstrukcija. U idućim poglavljima dan je pregled stanja u području procjene stanja postojećih zidanih konstrukcija, s posebnim naglaskom na nešto jednostavnije i brže metode. Bitno je napomenuti da se obrađuju i metode vezane uz obične konstrukcije izvedene u opeci [3] kao i povijesne konstrukcije izvedene u kamenu [4]. Sve te metode uspoređuju se u ovom radu kako bi se uspostavio standardizirani postupak za dobivanje cjelovitog prikaza stanja čitave zidane konstrukcije.

2 MQI (Masonry Quality Index)

Ponašanje zida, kao heterogenog sustava, ovisi o nizu faktora kao što su tlačna i posmična čvrstoća zidnih elemenata i morta, oblik zidnih elemenata te njihova tekstura [5, 6]. S obzirom na velike količine faktora, za određivanje nosivosti zida i procjenu njegove kvalitete potrebno je primijeniti destruktivne i poludestruktivne metode koje nisu uvijek prihvatljive osobito kod povijesnih građevina gdje se zahtjevi konzervatora moraju ispuniti [4, 7]. Zbog toga je u Italiji razvijen kvalitativni, tj. vizualni pristup procjeni stanja zida i zidanih konstrukcija MQI. Ideja je uspostaviti jednostavan i sustavan pristup analizi, tj. procjeni stanja zidanih konstrukcija temeljen na idealnom ponašanju zida i procjeni mehaničkih svojstava pripadajućih materijala (kamen, opeka i mort). Kako bi se dobila ta mehanička svojstva, koristi se

sedam parametara. Procjena podrazumijeva znanje inženjera u području zidanih i povijesnih građevina čiji je zadatak svaki od sedam parametara smjestiti u jednu od tri kategorije, tj. ocijeniti svaki od sedam parametara. Moguće kategorije su: ispunjen (F-Fulfilled), djelomično ispunjen (PF-Partially Fulfilled) i neispunjen (NF-Not Fulfilled) [5]. Slijedi kraći opis parametara koje treba uzeti u obzir.

2.1 Mehanička svojstva zidnih elemenata (SM)

Ovaj parametar u obzir uzima mehanička svojstva samo zidnih elemenata kao i stanje očuvanosti u kojem se nalaze. Primjerice ako je više od 50 % zidnih elemenata u građevini oštećeno, ako je korištena nepečena ili glinena opeka ili ako je opeka šuplja s nedovoljno opečnog materijala, dodjeljuje se ocjena NF. Ako je nešto manje elemenata oštećeno (10 - 50 %) te ako se koristi kvalitetnija šuplja opeka ili opeka napravljena od pješčenjaka, ocjena će biti PF. U slučaju da nema oštećenih elemenata (< 10 %) te da je korištena visoko kvalitetna pečena opeka, šuplje opeke s manjim udjelom šupljina (< 45 %), kameni blokovi te betonski blokovi, ocjena će biti F.

2.2 Dimenzije zidnih elemenata (SD)

Ako se koriste elementi manjih dimenzija (< 20 cm) u većinskom dijelu zida ili konstrukcije, dodjeljuje se ocjena NF. Ako su elementi veći (20 – 40 cm) u većinskom dijelu, dodjeljuje se ocjena PF, a ako su im dimenzije veće od 40 cm, dodjeljuje se ocjena F (slika 1.).



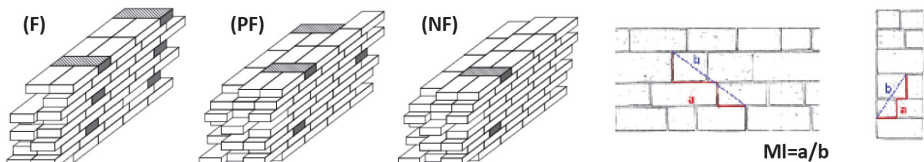
Slika 1. Dimenzije zidnih elemenata (SD) [5]

2.3 Oblik zidnih elemenata (SS)

Ocjena NF dodijelit će se zidnim elementima koji su većinom sastavljeni od običnih zaobljenih oblutaka ili šljunčanih elemenata u oba sloja zida. Ako je tih elemenata manje u jednom sloju zida, a da je drugi sloj izveden od savršeno rezanog kamena ili opeke, dodjeljuje se ocjena PF. U konačnici, ako su oba sloja izvedena od fino rezanog kamena ili od kvalitetno posložene opeke, dodjeljuje se ocjena F.

2.4 Povezanost slojeva zida (WC)

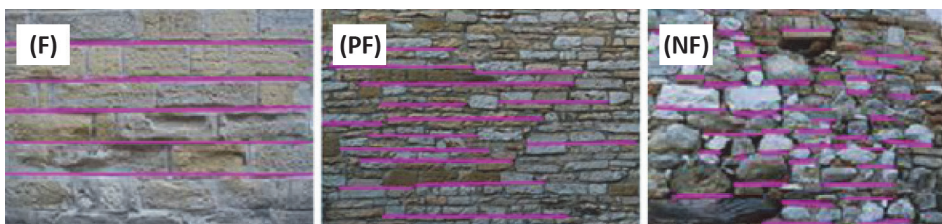
Povezanost slojeva zida (prisutnost vezne opeke) ima vrlo velik utjecaj na njegovo ponašanje izvan ravnine. Kvalitativni postupak se provodi kada presjek zida nije vidljiv. U tom slučaju ocjena NF se dodjeljuje ako nema vezne opeke ili ako ih je manje od 2 kom./m². Ako je debljina zida veća od veće dimenzije zidnog elementa te ako postoji određeni broj veznih opeka (2 - 5 kom./m²), dodjeljuje se ocjena PF. Ocjena F podrazumijeva sistematični raspored veznih opeka (> 5 kom./m²) i debljinu zida sličnu većoj dimenziji zidnog elementa (slika 2.a). Ako je površina zida pak vidljiva, primjenjuje se kvantitativni kriterij preko minimalne bezdimenzijske vrijednosti M_1 . Ta vrijednost predstavlja omjer između minimalne duljine potrebne da se povežu dvije nasumice odabrane točke zida koristeći se samo horizontalnim i vertikalnim sljubnicama morta i pravocrtne udaljenosti tih dviju dijagonalnih točaka (slika 2.b). Pravocrtna udaljenost odgovara 1 m, s mogućnošću korištenja nešto manjih duljina. Ako je taj odnos manji od 1,25 smatra se da je povezanost slojeva slaba i dodjeljuje se ocjena NF. Ako je vrijednost veća od 1,55, dodjeljuje se ocjena F.



Slika 2. a) Kvalitativna analiza povezanosti slojeva zida [5]; b) Dobivanje faktora M_1 [5]

2.5 Svojstva horizontalnih sljubnica (HJ)

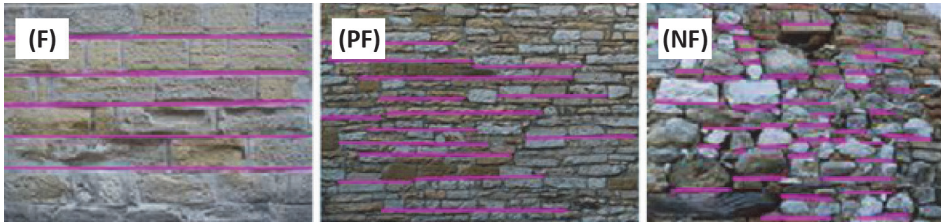
Ovisno o načinu izvedbe i vrsti zida, horizontalne sljubnice su nekada nekontinuirane što može utjecati na tlačnu i posmičnu nosivost čitavog zida (slika 3.).



Slika 3. Kontinuiranost horizontalnih sljubnica [5]

2.6 Svojstva vertikalnih sljubnica (VJ)

Kao i kod povezanosti slojeva zida, vertikalnost sljubnica se može ocijeniti na kvalitativan i kvantitativan način. Kvalitativni pristup je vezan uz raspored vertikalnih sljubnica gdje se ocjena NF dodjeljuje zidovima kad su sve sljubnice na istoj razini u vertikalnom smjeru. Ako su djelomično kvalitetno raspoređene dodjeljuje se ocjena PF, dok će ocjena F biti dodijeljena onome zidu gdje je vertikalna sljubnica između dva zidna elementa praktički na polovici samog zidnog elementa u redu iznad i ispod promatranog reda (slika 4.). Što se kvantitativnog pristupa tiče, opet će se koristiti vrijednost M_1 pojašnjena iznad, no u ovom slučaju broje se samo vertikalne sljubnice. Ako je ta vrijednost manja od 1,4, dodjeljuje se ocjena NF, a ako je veća od 1,6 dodjeljuje se ocjena F.



Slika 4. Raspored vertikalnih sljubnica [5]

2.7 Mehanička svojstva morta (MM)

Ovisno o vrsti materijala koji se koristi za mort te kvaliteti veze između morta i zidnih elemenata dodjeljuje se jedna od tri ocjene. Ocjena NF dodjeljuje se mortovima koji se lako mogu ukloniti, prašini te situacijama gdje morta više niti nema. Ocjena PF dodjeljuje se mortovima srednje visoke kvalitete, a F mortovima s visokokvalitetnim svojstvima.

Ovisno o ocjeni koja se dodijeli pojedinom parametru te smjeru djelovanja, vrijednosti od 0 do 1 se daju za svaki pojedini parametar (tablica 1.).

Tablica 1. Numeričke vrijednosti za pojedini parametar [5]

	Vertikalno djelovanje			Horizontalno djelovanje u ravnini zida			Horizontalno djelovanje izvan ravnine zida		
	NF	PF	F	NF	PF	F	NF	PF	F
HJ	0	1	2	0	0,5	1	0	1	2
WC	0	1	1	0	1	2	0	1,5	3
SS	0	1,5	3	0	1	2	0	1	2
VJ	0	0,5	1	0	1	2	0	0,5	1
SD	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0,5	1
MM	0	0,5	2	0	1	2	0	0,5	1
SM	0,3	0,7	1	0,3	0,7	1	0,5	0,7	1

Na temelju vrijednosti iz tablice određuje se numerička vrijednost MQI prema idućoj formuli:

$$MQI = SM \times (SD+SS+WC+HJ+VJ+MM) \quad (1)$$

Na temelju te vrijednosti moguće je dobiti mehanička svojstva zida poput tlačne čvrstoće, posmične čvrstoće i modula elastičnosti, što je detaljnije opisano u [5], [8]. Uz to, zid se smješta u jednu od tri kategorije kvalitete, što je i primarni cilj ove metode (tablica 2). Uz MQI postoje naravno i neke slične metode [9], no MQI je općeprihvaćen kao najkvalitetniji način procjene kvalitete zida i njegovih mehaničkih svojstava na brz i jednostavan način.

Tablica 2. Kategorije kvalitete zida prema MQI [5]

Kategorija	A (izvršno ponašanje)	B (prosječna kvaliteta zida)	C (neodgovarajuće ponašanje zida)
Vertikalna djelovanja	0 < MQI < 2,5	2,5 < MQI < 5,0	5,0 < MQI < 10,0
Horizontalna djelovanja izvan ravnine	0 < MQI < 4,0	4,0 < MQI < 7,0	7,0 < MQI < 10,0
Horizontalna djelovanja u ravnini	0 < MQI < 3,0	3,0 < MQI < 5,0	5,0 < MQI < 10,0

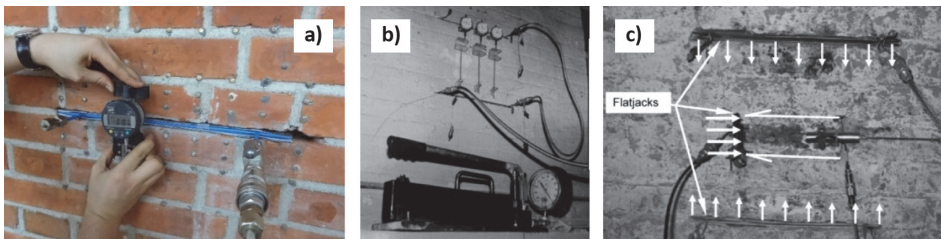
3 Plosnate preše (flat jacks)

Osim vizualnih metoda, u području nedestruktivnih ispitivanja postoji niz metoda koje podrazumijevaju korištenje uređaja. Među najpoznatijim metodama takvog tipa nalazi se i sustav testova s plosnatim prešama (engl. flat jack). Ova ispitivanja su vrlo jednostavna te podrazumijevaju korištenje samo plosnatih preša, hidraulične pumpe i uređaja za mjerenje deformacija. Princip korištenja je takav da se u mortu naprave očišćeni otvori u koje se postavljaju plosnate preše koje su vrlo tanke. U njima se nakon toga pomoću hidraulične pumpe izaziva stanje pritiska, pa one dijeluju tlačno na ostatak zida prilikom čega je moguće mjeriti površinske deformacije i time dobiti informacije o postojećem stanju naprezanja u zidu, kao i informacije o krutosti i čvrstoći zida [10]. Postoje različite vrste plosnatih preša podijeljene prema njihovom obliku i materijalu, pa se tako razlikuju konvencionalne metalne i niz deformabilnih plosnatih preša. Treba napomenuti da se upotreba aluminija za njihovu izradu pokazala korisnom pri ispitivanju povijesnih građevina [3]. Što se tiče ispitivanja koja je moguće provoditi pomoću ovih uređaja, najprije treba spomenuti dobivanje tlačnog naprezanja u zidu. Prije formiranja otvora u mortu, mjeri se udaljenost između referentnih točaka koje se nalaze sa suprotnih strana budućeg otvora. Prilikom uklanjanja morta, tlačna naprezanja unutar zida malo zatvore otvor. Potom se u otvor postavlja jedna plosnata preša kojom se unosi pritisak

kako bi se otvor vratio u originalnu poziciju (slika 5.a) [10]. Pritisak (p) potreban da se referentne točke vrate u početnu poziciju te konstanta kalibracije plosnate preše (K_e) i odnos između nosive površine plosnate preše i površine otvora (K_c) daju vrijednost tlačnih naprezanja (f_m) u zidu [11].

$$f_m = p \cdot K_e \cdot K_c \quad (2)$$

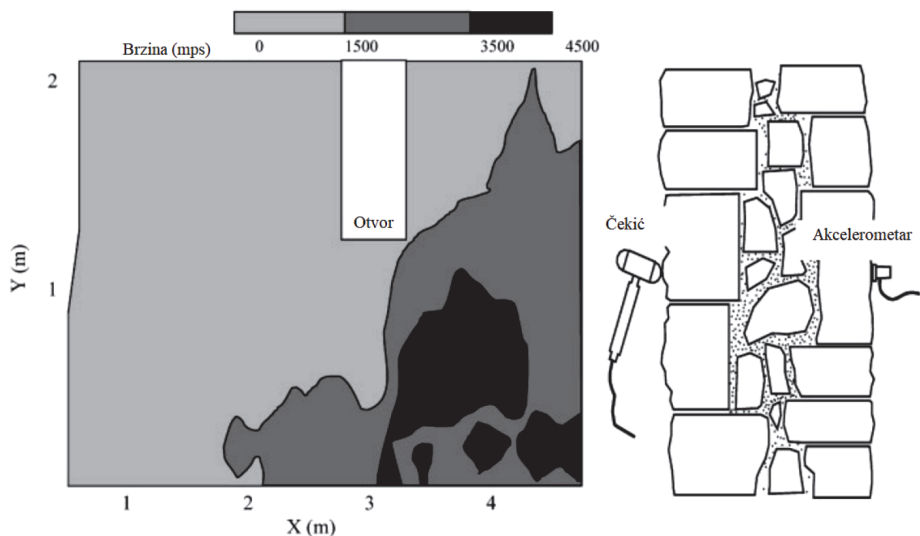
Uz određivanje tlačnog naprezanja, postoji i test za određivanje deformabilnosti zida. Test podrazumijeva korištenje dvije plosnate preše, jedne iznad druge. Prilikom istovremenog pritiska formira se stanje tlačnog naprezanja u segmentu zida između njih. Površinske deformacije mjere se pomoću mjerača pomaka raspoređenih po licu zida (slika 5.b). Rezultati ovog ispitivanja obično se prikazuju u obliku dijagrama naprezanje – relativna deformacije prema kojem je moguće dobiti i modul elastičnosti [10]. Pomoću plosnatih preša moguće je dobiti i posmičnu čvrstoću zida [10] i modul posmika [12]. Za dobivanje posmične čvrstoće koristi se tzv. “push test”. Taj test podrazumijeva uklanjanje jednog zidnog elementa (opeka, kamen) te postavljanja hidraulične preše u taj otvor. Sa svake strane promatranog zidnog elementa koji se sada nalazi pored preše uklanja se mort. Guranjem, tj. pritiskom pomoću preše dolazi do smicanja sljubnica morta neposredno iznad i ispod promatranog elementa te se na temelju posmične čvrstoće morta dobiva posmična čvrstoća zida. Ova metoda se nažalost može primjenjivati samo kod sustava gdje su mortovi vrlo slabi, a zidni elementi vrlo čvrsti te se u modernijim sustavima s kvalitetnijim mortom ne može koristiti. Postoje tri varijante opisane u [10] od kojih je najkvalitetnija metoda koja podrazumijeva upotrebu tri plosnate preše. Iznad i ispod promatranog područja ispitivanja se postavljaju dvije plosnate preše kako bi se osiguralo konstantno vertikalno tlačno naprezanje testnog uzorka. Treća se postavlja s jedne od strana promatranog elementa te njezinim djelovanjem dolazi do smicanja i time određivanja posmične čvrstoće (slika 5.c).



Slika 5. a) Mjerenje tlačnog naprezanja zida (jedna plosnata preša) [3]; b) Određivanje površinskih deformacija (dvije plosnate preše) [10]; c) Određivanje posmične čvrstoće zida (tri plosnate preše) [10]

4 Ispitivanja pomoću mjerenja brzine zvuka ili ultrazvuka

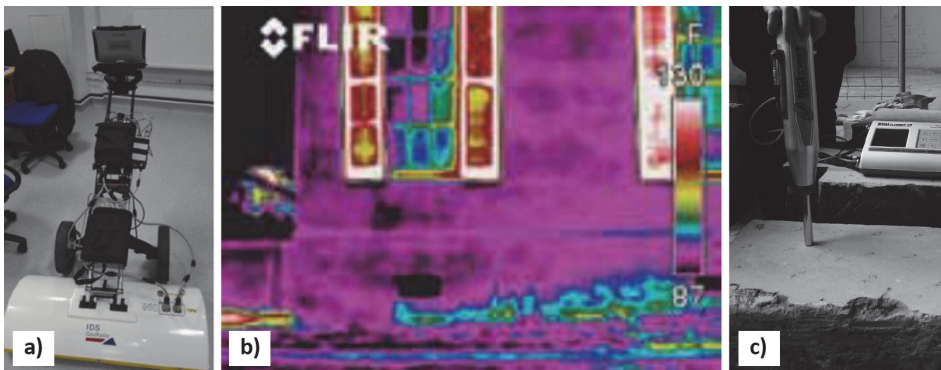
Ispitivanja pomoću mjerenja brzine zvuka ili ultrazvuka imaju vrlo široku primjenu u području zidanih konstrukcija. Ultrazvučna metoda podrazumijeva korištenje dva pretvornika, sa svake strane zida. Oba pretvornika se za površinu zida spajaju pomoću gela ili gumenih pločica kako bi se ostvario maksimalni prijenos energije. Pomoću jednog pretvornika odašilje se val koji putuje kroz poprečni presjek zida do pretvornika koji taj val prihvaća i pretvara ga natrag u električnu energiju. Vrijeme prolaska vala očitava se u mikrosekundama. Ako se govori o zvučnoj metodi, valovi niske frekvencije se generiraju pomoću gumenog čekića. Njegova masa i čvrstoća, tj. materijal od kojeg je izrađen, definiraju energiju i frekvenciju inicijalnog vala. S druge strane zida nalazi se akcelerometar koji prihvaća valove (slika 6.). Njegov zadatak je da mjeri brzinu prolaska vala. Kako bi ova metoda bila valjana, sve mora biti provedeno s vrlo velikom preciznošću [10, 13]. Na temelju brzine prolaska vala moguće je dobiti niz informacija o materijalu od kojega je zid napravljen kao i o šupljinama unutar samog zida [13, 14]. Izuzev rasporeda šupljina unutar zida, moguće je dobiti vrijednost modula elastičnosti, faktora prigušenja kao i procjenu čvrstoće zida [15]. Najveća je prednost ove metode ta da je relativno jeftina [15] te da se može primjenjivati i kod zida od betonskih elemenata [15], kamenog zida [16], a i kod obične opeke [17]. Na kraju, bitno je napomenuti da iako se često koriste kod zidanih konstrukcija, ove metode nisu najprikladnije kod povijesnih građevina, pa se često se primjenjuju u kombinaciji s nekim drugim metodama.



Slika 6. Prikaz brzina zvuka gdje su tamnije označena područja s većim brzinama, tj. "zdravom" strukturom zida [10]

5 Ostale metode – Kratki osvrt

Osim tri obrađene metode, postoji i niz drugih koje se mogu koristiti za određivanje svojstava zidanih konstrukcija. Iako se češće koristi kod betonskih konstrukcija za određivanje položaja armature i debljine elemenata, Ground Penetrating Radar (GPR, “radar koji prodire u tlo”) može se koristiti i kod zidanih konstrukcija za određivanje mjesta gdje se nalaze šupljine unutar zida [18]. Rad tog uređaja zasnovan je na emitiranju radiovalova u konstrukciju i detektiranju njihova odjeka kao pokazatelja materijalnih parametara zida tj. građevine (slika 7.a) [19]. Za određivanje defekata i nekonzistentnosti kod zidanih konstrukcija moguće je koristiti i infracrvenu termografiju (slika 7.b). Ova nedestruktivna metoda podrazumijeva termalnu simulaciju nekog objekta ili elementa. Pomoću infracrvene kamere prate se varijacije u površinskoj temperaturi primjerice zida prilikom faza grijanja i hlađenja [20]. Promjene u temperaturi su pokazatelji određene nehomogenosti u materijalu. Izuzev defekata u strukturi, ova metoda je korisna i za određivanje vlage unutar konstrukcije [21]. U konačnici, za određivanje tlačne čvrstoće morta i zidnih elemenata uz potrebne kalibracije moguće je koristiti i sklerometar (slika 7.c) [22]. Ova metoda je vrlo korisna, jednostavna i brza te ima vrlo široku primjenu kod raznih vrsta materijala. Vrlo je bitno napomenuti da se često koristi kod građevina kulturne i povijesne baštine [23, 24].



Slika 7. a) GPR [25]; b) Infracrvena termografija [20]; c) Sklerometar (Rebound hammer) [23]

6 Zaključak

Potres koji je zadesio Zagreb 22. ožujka 2020. bio je samo podsjetnik na količinu neodržanih zidanih građevina koje postoje u gradu Zagrebu. S tim u vezi podsjetio nas je na važnost održavanja takvih građevina te na njihovu procjenu stanja i ispitivanje. Iako postoji izniman broj visokokvalitetnih metoda ispitivanja poput MQI-a, plosnatih preša, ultrazvuka, GPR-a, infracrvene termografije i sklerometra, i premda sve imaju svoje prednosti i nedostatke, nije potrebno sve njih koristiti da bi bila kvalitetna procjena stanja jedne konstrukcije. Razloga je za ovo mnogo, a cijena, kvaliteta podataka i brzina su najvažniji od njih. Vizualni pregled (MQI) vrlo je bitan kod procjene stanja postojećih zidanih konstrukcija kako bi se dobila gruba procjena niza svojstava ziđa kao i podataka vezanih uz vrstu ziđa te opće stanje konstrukcije. Što se tiče dobivanja podataka poput tlačne i posmične čvrstoće ziđa te modula elastičnosti, sustav plosnatih preša smatra se najboljim pristupom, iako se mora ukloniti mort za njegovu uporabu. Podaci koji se dobiju su vrlo visoke kvalitete i pokrivaju vrlo veliki broj materijalnih svojstava, što uređaji poput sklerometra ne mogu. Na kraju, metode temeljene na brzinama zvuka ili ultrazvuka vrlo su bitne za dobivanje stanja u kojem se nalazi neki zid te za dobivanje podataka o nehomogenostima unutar zida. Kombinacijom tih triju metoda može se dobiti vrlo jasna slika stanja neke konstrukcije i na temelju toga donijeti odluka o mogućim metodama sanacije, ako za njih bude potrebe.

Literatura

- [1] Babatunde, S. A.: Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers, *Compos. Struct.*, 161 (2017), pp. 246–255.
- [2] Bournas, D. A.: Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites combined with insulation materials: A new concept, *Compos. Part B Eng.*, 148 (2018), pp. 166–179.
- [3] Łatka, D.; Matysek, P.: The Estimation of Compressive Stress Level in Brick Masonry Using the Flat-jack Method, *Procedia Eng.*, 193 (2017), pp. 266–272.
- [4] Foti, D.: Non-destructive techniques and monitoring for the evolutive damage detection of an ancient masonry structure, *Key Eng. Mater.*, 628 (2014) August 2014, pp. 168–177.
- [5] Borri, A. et al.: A method for the analysis and classification of historic masonry, *Bull. Earthq. Eng.*, 13 (2015) 9, pp. 2647–2665.
- [6] Marino, M. et al.: Experimental Data of Friction Coefficients for some Types of Masonry and its Correlation with an Index of Quality Masonry (IQM), *Second Eur. Conf. Earthq. Eng. Seismol.*, (2014), pp. 1–12.

- [7] Boschi, S. et al.: Mechanical characterization of particular masonry panels in tuscany, Brick Block Mason. Trends, Innov. Challenges - Proc. 16th Int. Brick Block Mason. Conf. IBMAC 2016, 1 (2016), pp. 1447–1456.
- [8] Borri, A. et al.: Calibration of a visual method for the analysis of the mechanical properties of historic masonry, Procedia Struct. Integr., 11 (2018), pp. 418–427.
- [9] Su, Q. et al.: Seismic Damage Assessment Indexes for Masonry Structures, J. Struct. Eng. (United States), 145 (2019) 7.
- [10] Schuller, M. Pp.: Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures, Prog. Struct. Eng. Mater., 5 (2003) 4, pp. 239–251.
- [11] Simões, A. et al.: Flat-Jack Tests on Old Masonry Buildings, 15th Int. Conf. Expp. Mech., 1 (2012) i, pp. 3056.
- [12] Croce, Pp. et al.: Shear modulus of masonry walls: A critical review, Procedia Struct. Integr., 11 (2018), pp. 339–346.
- [13] De Paepe, A. E. et al.: Non-destructive test methods for masonry structures, J. Chem. Inf. Model., 53 (2019) 9, pp. 1689–1699.
- [14] Mesquita, E. et al.: Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements, J. Build. Eng., 19 (2018), pp. 172–180.
- [15] Sajid, S. H. et al.: Strength estimation of concrete masonry units using stress-wave methods, Constr. Build. Mater., 163 (2018), pp. 518–528.
- [16] Martini, R. et al.: Advances on the use of non-destructive techniques for mechanical characterization of stone masonry: GPR and sonic tests, Procedia Struct. Integr., 5 (2017), pp. 1108–1115.
- [17] Valluzzi, M. R. et al.: Calibration of sonic pulse velocity tests for detection of variable conditions in masonry walls, Constr. Build. Mater., 192 (2018), pp. 272–286.
- [18] Agred, K. et al.: Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna, Constr. Build. Mater., 188 (2018), pp. 1119–1127.
- [19] Wai-Lok Lai, W. et al.: A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis, NDT E Int., 96 (2018) January, pp. 58–78.
- [20] Meola, C.: Infrared thermography of masonry structures, Infrared Phys. Technol., 49 (2007) 3 SPEC. ISS., pp. 228–233.
- [21] Geister, A.: Structural teSting Evaluating Existing Masonry Construction, Struct. Test., (2013) March, pp. 34–37.

- [22] Sýkora, M. et al.: Assessment of compressive strength of historic masonry using non-destructive and destructive techniques, *Constr. Build. Mater.*, 193 (2018), pp. 196–210.
- [23] Vasanelli, E. et al.: Combining non-invasive techniques for reliable prediction of soft stone strength in historic masonries, *Constr. Build. Mater.*, 146 (2017), pp. 744–754.
- [24] Vasanelli, E. et al.: Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive techniques for the evaluation of uniaxial compressive strength of stone masonry units, *Constr. Build. Mater.*, 124 (2016), pp. 575–581.
- [25] Alani, A. M. et al.: An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies, *NDT E Int.*, (2020), May, pp. 102288.

Standardiziranje usluga upravljanja projektima gradnje investitorima obveznicima javne nabave u Republici Hrvatskoj

Romano Perić¹, izv. prof. dr. sc. **Mladen Vukomanović²**

¹BIM projekt d.o.o., romano.peric@bimprojekt.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mladen.vukomanovic@grad.uniz.hr

Sažetak

Iako je upravljanje projektom gradnje kao djelatnost i zakonska kategorija u obvezatnoj primjeni u RH već petu godinu, u praksi još uvijek nije rezultiralo standardiziranjem tih usluga. Objektivnim konceptom (obvezatne) primjene standardnih uvjeta za usluge upravljanja projektom gradnje omogućila bi se njihova održivost bez obzira na postojanje zakonske obveze. U radu je kroz analizu stanja područja identificiran različiti pristup javnih i sektorskih naručitelja kod ugovaranja usluga upravljanja projektom gradnje. Oni uz zakonsku kategoriju ugovaraju i druge usluge vezane na upravljanje projektima i tehničku pomoć kao ugovornu kategoriju, što implicira određene probleme i ograničenja - što su i zaključci rada. Na kraju rada poziva se na daljnja istraživanja stanja područja te uspostavljanje uzročno-posljedične veze između identificirane problematike s potrebom za standardiziranje usluga na bazi najboljih globalnih praksi i standarda te njihovo kodificiranje.

Ključne riječi: upravljanje projektom gradnje, kodifikacija, standardiziranje, globalni standardi, održivost, zakon

Standardization of project management services for public procurement contracting authorities in the Republic of Croatia

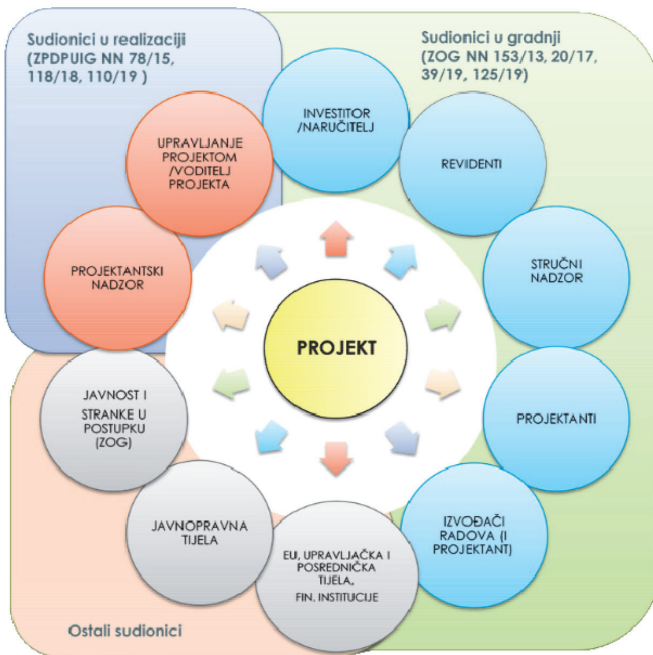
Abstract

Although Construction Project Management as an activity and a legal category has been mandatory in RH for five year, in practice it has not yet resulted in the standardization of these services. An objective concept of (mandatory) application of standard condition for Construction Project Management services would enable their sustainability regardless of a legal obligation. The paper, through the analysis of the state of the area, identifies the different approach of public and sectoral contracting authorities in contracting Construction Project Management services. In addition to the legal category, they contract other services related to project management and technical assistance as a contractual category, which implies certain problems and limitations - which are the conclusions of the work. At the end of the paper, it calls for further research into the state of the area and the establishment of a cause-and-effect relationship between the identified issues with the need to standardize services based on best global practices and standards and codifying them.

Key words: construction project management, codifying, standardization, global standards, sustainability, law

1 Uvod

Još donedavno, točnije do 2015., u realizaciji je građevinskih projekata u RH financiranih sredstvima obveznika javne nabave postojala klasična shema osnovnih (su) dionika u procesu gradnje: naručitelj/investitor – projektant – nadzor – ugovaratelj/izvođač [1], takozvani separatan model građenja [2]. Javni naručitelji, za razliku od nekih privatnih investitora i/ili tzv. developera, ne postoje zbog projekata (gradnje) i samim time jasno je da im je problem samostalno upravljati procesima; izraditi projektni zadatak i koordinirati sve specifične procese pri realizaciji nekog projekta, kao i koordinirati sve (su)dionike procesa. Projekti gradnje s vremenom su postali sve kompleksniji po svom sadržaju i složeniji za upravljanje; regulativa se promijenila i uskladila sa zakonodavstvom i Direktivama EU; građevinska poduzeća i dobavljači su se sve više specijalizirali za uska područja kao i projektantski uredi. Zbog toga spomenuta klasična shema sudionika gradnje više ne egzistira kao takva. Interakcija dionika procesa postaje sve kompleksnija pa se neminovno javila potreba za uvođenjem novog sudionika koji ima specifična znanja i kompetencije za upravljanje procesima i koji, između ostalog, savjetuje investitora te koordinira projektom tijekom njegove realizacije. Na slici 1. prikazana je tipična matrica interesnih strana kod realizacije projekta gradnje [3].



Slika 1. Matrica interesnih strana projekta gradnje u RH [3]

Novi dionik procesa je voditelj projekta, koji od srpnja 2015. postaje obvezatan (su) dionik kojeg je javni naručitelj (a od 1. siječnja 2019. godine i sektorski naručitelj) dužan imenovati na određenim projektima [4]. Tako se i dotadašnja klasična shema odnosa među osnovnim (su)dionicima u procesu gradnje zamjenjuje novom: naručitelj (investitor) – voditelj projekta – projektant – nadzor – ugovaratelj (izvođač). Na neki način se radi o novom “sudioniku u gradnji”, premda ga Zakon o gradnji (još uvijek) ne prepoznaje kao takvog, pa se može reći da se zapravo radi o sudionicima u projektu gradnje. Iako je spomenuta praksa imenovanja voditelja projekta u primjeni već gotovo pet godina, još uvijek nije stvorena platforma, odnosno standard prema kojem bi svi investitori u javnoj nabavi dobili jednaku razinu i kvalitetu usluga upravljanja projektima gradnje.

Projektno vođenje u modernim građevinskim projektima zahtijeva interdisciplinarna znanja modernog menadžmenta u kombinaciji s poznavanjem i razumijevanjem procesa gradnje, odnosno građenja, ali i ekonomije (financija), sociologije i prava [5, 6]. U tom kontekstu sastav tima za upravljanje projektom kao i zastupljenost pojedine discipline, odnosno polja određenih područja (znanosti), ovisi o vrsti, kompleksnosti, veličini projekta (gradnje) kao i o fazi realizacije projekta u kojoj se upravlja, a čije značajke analogno određuju i vrstu i opseg usluga koje tim za upravljanje projektom treba pružiti. Tako i upravljanje projektima gradnje kao zakonska kategorija uključuje financijsko, pravno i tehničko savjetovanje u vezi s projektiranjem, građenjem, uporabom i uklanjanjem građevina, te financijsku, pravnu i tehničku pripremu i planiranje poslova u vezi s gradnjom te praćenje provođenja tog plana [4]. Međutim, sadašnja praksa i zakonska platforma, bez obzira na kogentnost odredbi Zakona o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje (ZPDPU), još uvijek nisu ujednačili pristup javnih i sektorskih naručitelja, već im je ostavljeno na dispoziciju da ugovaraju “proširene” usluge upravljanja projektom gradnje koje se preklapaju sa uslugama drugih (su)dionika pa posljedično tome nastaju problemi kod realizacije projekata, a upravljanje projektom ne postiže ciljeve koji su pretpostavljeni ugovorom i zakonima. Standardiziranjem usluga upravljanja projektom gradnje izbjegli bi se “paralelni kolosijeci”, povećala transparentnost i učinkovitost u trošenju javnog novca što je uostalom i glavni cilj zakonske platforme unutar koje se usluge pružaju, a to su Zakon o javnoj nabavi (ZJN) i ZPDPU čime bi se domaća praksa u upravljanju projektima gradnje približila međunarodnim standardima. Standardiziranjem kroz autonomni izvor prava u obliku standardnih Općih uvjeta ugovaranja usluga upravljanja projektom gradnje, te eventualna kodifikacija istih u uzance mogla bi stvoriti pretpostavku za njihovu primjenu neovisno o trenutnoj platformi koja ih određuje kao zakonsku kategoriju, odnosno obvezu za investitore obveznike javne nabave.

U ovom radu se kroz pregled literature i raspravu upozorava na nužnost standardiziranja predmetnih usluga, te se zadaje okvir i postavljaju pretpostavke za istraživanje najboljih svjetskih praksi, standarda, autonomnih izvora prava i trendova koje

je moguće primijeniti kod procesa standardizacije usluga upravljanja projektom gradnje koji čine odnos između investitora (naručitelja) obveznika javne nabave, koji može i ne mora biti trgovac, i pružatelja usluga upravljanja projektom gradnje (voditelja projekta) koji je u pravilu trgovac.

Rad je strukturiran u četiri poglavlja. Uvodno je izložena tema i struktura rada, a kroz analizu stanja područja su prikazane kratka geneza upravljanja projektima i platforma unutar koje se pružaju usluge upravljanja projektom gradnje investitorima obveznicima javne nabave u Republici Hrvatskoj, kao i neke od najznačajnijih svjetskih praksi i standarda za upravljanje projektima. Kroz poglavlje rasprave i u zaključku dodatno se upozorilo na neke nelogičnosti i problematiku koja je prisutna u praksi. U zaključku je ujedno dan smjer daljnjeg istraživanja koje bi moglo potvrditi da je standardizacija usluga upravljanja projektima gradnje investitorima obveznicima javne nabave kroz autonomni izvor prava, i njegova kodifikacija u uzance, moguće rješenje identificiranih problema iz prakse, što je uz stvaranje perspektive za daljnje istraživanje i rezultat rada.

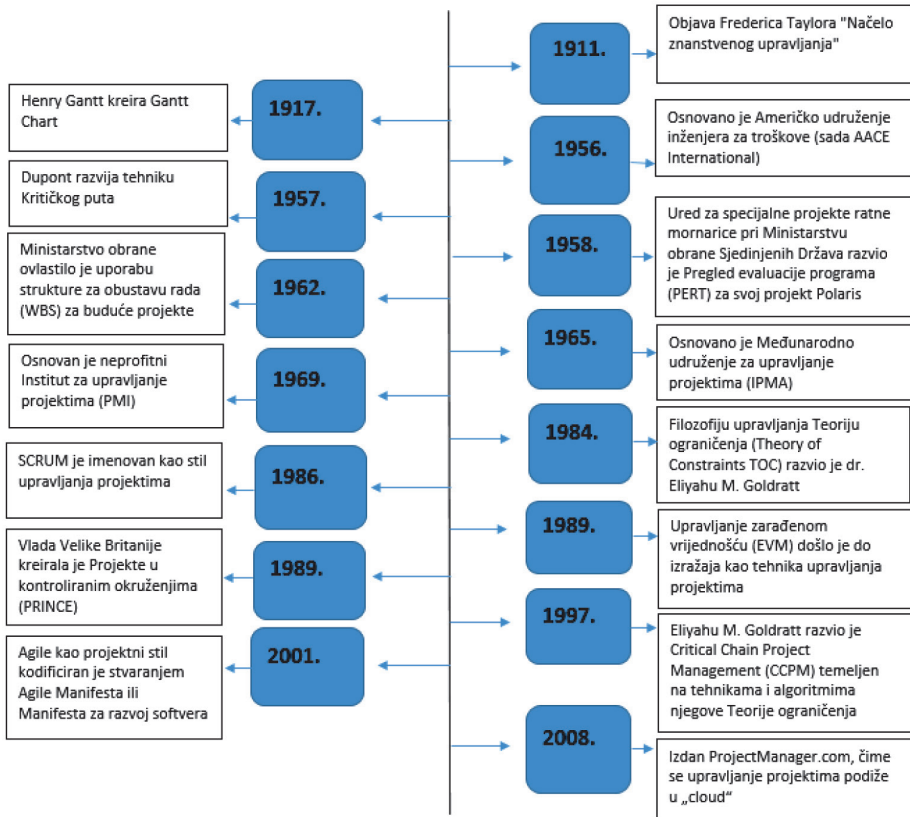
2 Analiza stanja područja

Za analizu područja bitno je primijetiti da su projekti prisutni u svim područjima ljudske djelatnosti (poslovanje, kultura, sport, politika, vojska), pa se danas svijet može proglasiti svijetom projekata [7]. Analiza i razumijevanje stanja područja te uspostava uzročno posljedične veze između uočene problematike i mogućnosti za njezino rješavanje nužni su preduvjeti za daljnje istraživanje. Da bi to bilo moguće, treba prije svega proučiti genezu stvaranja potrebe i razvoja procesa upravljanja projektima (gradnje) kao discipline i profesije, ali i povijest i razvoj izvora javnog i materijalnog prava u RH (posebice građevinsko pravo i građevinsko-tehničku regulativu). Naime, utjecaj relevantnih društvenih i pravnih normi na aspekt djelatnosti upravljanja projektima gradnje u RH određuje pravni okvir, odnosno platformu za pružanje usluga upravljanja projektom gradnje investitorima obveznicima javne nabave. Detaljna analiza stanja područja, uključivo povijest i genezu, te utjecaj relevantnih društvenih i pravnih normi na aspekt djelatnosti upravljanja projektima u RH detaljnije je obrađena u [3].

2.1 Povijest upravljanja projektima

Upravljanje projektima nastalo je prije više od stotinu godina pod utjecajem znanstvenih i sociološko-tehnoloških metodologija, ali je kao profesija, odnosno moderna disciplina kakvu danas poznajemo, prepoznata tek u novijoj povijesti, točnije tek prije nekoliko desetaka godina [8]. Geneza upravljanja projektima tijekom povijesti, kao i prepoznavanje ključnih događaja koji su pridonijeli razvoju upravljanja projektima kao modernoj profesiji i znanstvenoj disciplini, prikazana je na slici 2. [9].

POVIJEST PROJEKTOG MENADŽMENTA



Slika 2. Povijest projektnog menadžmenta – interpretacija i prilagodba Westlandove povijesti projektnog menadžmenta [9]

Upravljanje projektima kroz povijest razvijalo se i prilagođavalo potrebama tržišta. Konstantno se s razvojem građevinske industrije razvijaju i unaprjeđuju metode i alati za upravljanje projektima, kao što se tome prilagođavaju međunarodni standardi i prakse. No bez obzira na razvoj neke od tehnika, stilovi upravljanja prikazani na slici 2. i danas su osnova za planiranje, praćenje i kontrolu modernih projekata gradnje, premda postoji kontinuirani razvoj i činjenica da se povijest upravljanja projektima i dalje piše.

Povijest upravljanja projektima (gradnje) na prostorima bivše države usko je povezana s društvenim sustavom koji je do raspada bivše države (SFRJ) bio i formalno i

praktično prisutan. Službena ideologija i društveno-ekonomski sustav socijalističkog samoupravljanja uvjetovali su ukupno gospodarstvo koje je pretežito bilo orijentirano na državne, odnosno društvene projekte. Ekonomija je bila “dogovorna”, odnosno nije se zasnivala na tržišnim načelima. Privatnih investicija, odnosno projekata, nije bilo ili ih je bilo vrlo malo i bili su neznčajni u odnosu na ukupnu “masu”, a upravljanje tim projektima bilo je strogo linijsko. Kao i u ostatku Europe, nakon Drugog svjetskog rata, industrijalizacijom, elektrifikacijom i unapređenjem poljoprivrede stvarala se potreba za gradnjom naselja pa je i građevinski “boom”, uzročno-posljedično zahtijevao neku vrstu projektnog upravljanja.

Razvoj projekata gradnje od strane države najčešće se rukovodio nekim sociološko strateškim načelima, a ne ekonomičnošću i zdravim razumom. Dogovorna ekonomija značila je dogovaranje poslova direktnom pogodbom, pa upravljanje tako “dogovorenim” projektima nije se moglo temeljiti na osnovnim pretpostavkama modernog projektnog upravljanja. Prelaskom sa socijalističkog, samoupravnog sustava i “dogovorne” ekonomije na “kapitalistički” sustav i tržišnu ekonomiju, kao i otvaranjem prostora privatnim investicijama i ulaskom stranih investitora na tržište, dolaze nove prakse i trendovi. Privatni investitori, posebice stranci, traže da se projekti realiziraju prema tržišnim načelima, što je pretpostavljalo natječaje i ugovore koji su drugačiji i tržišni. Na taj se način i javne investicije počinju ugovarati po tržišnim načelima javne nabave, a ne više direktnom pogodbom.

2.2 Zakonski/pravni okvir upravljanja projektima gradnje u RH

Kako je već spomenuto, utjecaj relevantnih društvenih i pravnih normi na aspekt djelatnosti upravljanja projektima gradnje u RH određuje pravni okvir, odnosno platformu unutar koje se usluge upravljanja projektom gradnje sada pružaju investitorima obveznicima javne nabave u RH, ali isto tako i okvir unutar kojeg je moguće urediti standarde i autonomne izvore prava. Zasad u Hrvatskoj ne postoje standardizirani i općeprihvaćeni autonomni izvori prava koji bi se subjektivnim, odnosno objektivnim konceptom primjenjivali na usluge upravljanja projektom gradnje javnih i sektorskih naručitelja, **što otvara prostor za analizu i istraživanje mogućnosti i potrebe za stvaranjem takvog autonomnog izvora prava** i njegovu kodifikaciju. Prema sadašnjoj hijerarhiji izvora prava u Hrvatskoj, autonomni izvor prava može biti primjenjiv samo ako je njegova primjena ugovorena, bez obzira na to radi li se o privatnom naručitelju ili **naručitelju obvezniku javne nabave**, osim kod primjene kodificiranih poslovnih, odnosno trgovačkih običaja. Tamo postoji razlika u konceptu primjene ovisno o tome radi li se o naručitelju obvezniku javne nabave ili privatnom naručitelju (trgovcu), iako i naručitelj obveznik javne nabave može biti trgovac [10, 11]. Da bi neki standard kao autonomni izvor prava postao obvezatan za primjenu objektivnim konceptom (obvezatne) primjene (kod ugovaranja javnih usluga), potrebno je Zakonom o javnoj nabavi (ZJN) i/ili Pravilnikom o dokumenta-

ciji o nabavi te ponudi u postupcima javne nabave odrediti obvezu ili objavljivanja uvjeta ugovora (općih i posebnih) ili, ako bi se oni kodificirali, promijeniti odredbu o dispozitivnoj primjeni uzanci [12]. Na taj način bi se naručitelji koji nisu trgovci stavili u jednakopravan odnos s onima koji su trgovci (javni) i na koje se uz subjektivne elemente primjenjuju i objektivni elementi. Naime, kod komercijalne prakse, koja je u tako širokoj primjeni, trgovci očekuju da će ugovorne strane postupati u skladu s takvom praksom [13], odnosno poslovni (trgovački) običaji tijekom primjene postaju vrsta društvene norme koja se stvara dugotrajnim ponavljanjem nekog ponašanja u određenoj situaciji, tako da nakon relativno dugog vremena nastane svijest da je takvo ponašanje obvezatno [14]. Odredbama čl. 219 aktualnog ZJN propisano je vezano na primjenu uzanci: "Ako će se tijekom izvršenja ugovora o javnoj nabavi primjenjivati trgovački običaji (uzance), javni naručitelj obvezan je to navesti u dokumentaciji o nabavi te utvrditi odredbama ugovora." [11]. Dakle, aktualni ZJN izričito predviđa subjektivni koncept primjene svih oblika autonomnih izvora prava, uključivo posebnih uzanci, bez obzira na to radi li se o obveznicima javne nabave koji su trgovci ili osobe javnog prava. Kod osoba javnog prava je takav pristup ispravan i logički jer u slučaju da se subjektima koji nisu trgovci (osobe javnog prava npr.) nametne obveza poznavanja običaja, odnosno izvora prava u nekoj struci (npr. upravljanje projektima), samim time bi bile stavljene u nepovoljniji položaj jer u pravilu ulaze u ugovorni odnos s trgovcem koji poznaje i očekuje primjenu običaja i prakse. Stoga se može primijetiti da postoji očita nedosljednost zakonskog uređenja u spomenutim izvorima prava vezano za primjenu uzanci, odnosno poslovnih (trgovačkih) običaja, što bi se, u slučaju primjene standarda kao autonomnog izvora prava i/ili njihovom kodifikacijom u uzance, moglo izbjeći.

Uz spomenute zakone (ZOO kao temeljni zakon koji uređuje obvezatno pravne odnose između ugovornih strana i ZJN koji je u odnosu na ZOO specijalni zakon), kao relevantne zakone koji utječu na aspekt djelatnosti upravljanja projektima gradnje u RH, postoje i upravni zakoni i propisi koji također određuju okvir i platformu unutar koje treba raditi analizu i istraživanja. Zakoni koji su do sada regulirali upravno područje gradnje i prostornog uređenja mijenjali su se tijekom godina, a uz to uvjetovani političkim i gospodarskim aspektima kao i pristupom Republike Hrvatske u Europsku uniju, svojim su promjenama uvjetovali prilagodbu svih dionika. To se posebice odnosi na sudionike u gradnji u kontekstu definicije iz Zakona o gradnji (ZOG), a zbog toga i na načine, te na modalitete upravljanja projektima gradnje, kako na privatnim, tako i na javnim projektima. To su poglavito spomenuti ZOG i ZDPDUG donošenjem kojeg u srpnju 2015. prestaje biti na snazi Zakon o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji iz 2008. koji prvi puta uvodi upravljanje projektom gradnje kao djelatnost ali bez određivanja obveze za investitore, odnosno **naručitelje obveznike javne nabave, no istovremeno zajedno sa podzakonskim aktima uvodi niz ograničenja** koja nisu u skladu sa EU praksama i standardima [15]. Detaljan povijesni pregled promjena zakona s pojašnjenjima dat je u [3].

2.3 Primjenjivi globalni standardi i autonomni izvori prava

Prepoznavanjem i identifikacijom hrvatskog tržišta kao dijela globalnog tržišta jasno je da je razvoj praksi i standarda u RH pod direktnim utjecajem tog šireg tržišta, pa je analogno tome u svim procesima standardizacije i stvaranja hrvatskih (nacionalnih) autonomnih izvora prava potrebno primijeniti aktualne globalne trendove, odnosno standarde, uz uvjet maksimalno moguće njihove kompatibilnost s nacionalnim potrebama i postojećim zakonodavnim okvirom.

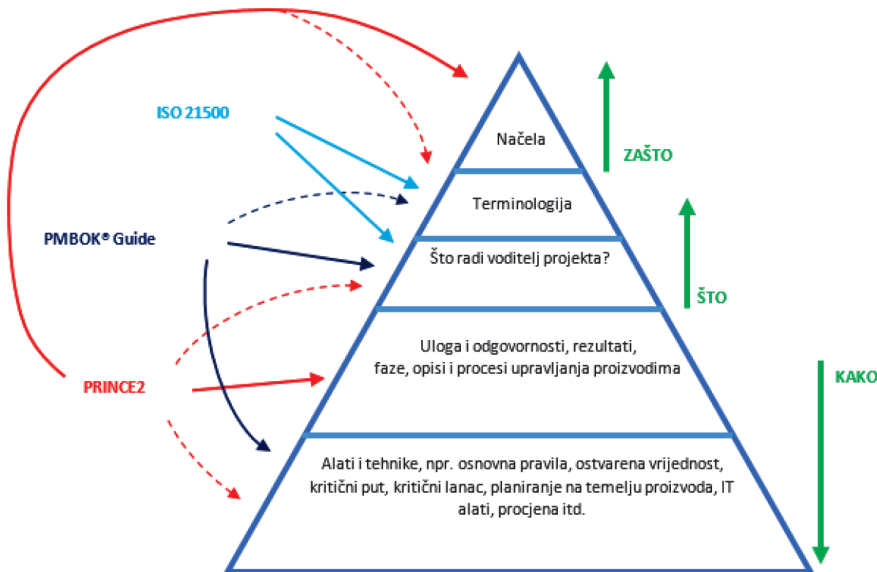
Najpoznatije međunarodne standardne forme ugovora i tenderskih procedura izradile su i publicirale banke, udruženja i stručne organizacije, a najznačajnije su: FIDIC (Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils); ABA99 – (The Association of Swedish Engineering Industries); ORGALIME, MF/1–Velika Britanija; SIA, AIA Contract (American Institute of Architects); ICE (The Institution of Civil Engineers); JCT (The Joint Contracts Tribunal, Design-Build Contract World Bank; MDB Harmonised Edition; ENAA Contract (Engineering Advancement Association of Japan, Model Form for International Contract for Process Plant Construction; Orgalime (Organisme de Liaison des Industries Mecaniques, Electriques, Electroniques et Metalliques Européennes); General Conditions for the Supply and Erection of Mechanical and Associated Electronic Products, EIC Contract (European International Contractors); UK General Conditions for Works Contracts; ECC, D4 PRAG Practical Guide for EC Ext. Actions; Guidelines selection and employment of Consultants under EBRD loans and ida credits & grants by World Bank borrowers; The World Bank group General Terms and Conditions Consulting Services.

Najpoznatiji svjetski standardi u upravljanju projektima koji se mogu uzeti u obzir pri oblikovanju autonomnih (nacionalnih) standarda i izvora prava za upravljanje projektima investitora obveznika javne nabave su: PMBOK, PRINCE2, ISO 21500, OpenPM², IPMA, APM. Slijedi sažet opis najznačajnijih obilježja nekih od spomenutih standarda koji su u praktičnoj primjeni i u Republici Hrvatskoj prema podacima s njihovih službenih stranica, a za PMBoK, PRINCE2 i ISO21500 i sažeta njihova analiza i usporedba:

- **IPMA ICB 4.0** – kompetencijski (profesionalni) standardi za razvoj kompetencija za upravljanje projektima kroz sveobuhvatan portfelj proizvoda i usluga koje izdaje International Project Management Association (IPMA). ICB 4.0 (Individual Competence Baseline) odnosi se na kompetencije pojedinaca u područjima upravljanja projektima, programima i portfeljem [16, 17]. IPMA certifikaciju pojedinaca u Hrvatskoj provodi HUUP CERT kao stručno i neovisno tijelo Hrvatske udruge za upravljanje projektima, u skladu s odobrenjem IPMA-e [17]. IPMA certifikati (A, B, C, D razine) u Republici Hrvatskoj su bitni jer su uz PMI-ove certifikate priznati prema Pravilniku o potrebnim znanjima iz područja upravljanja projektima kao međunarodni sustav ovjere sposobnosti upravljanja projektima, odnosno kao prihvaćeni dokaz o potrebnim znanjima iz područja upravljanja projektima [19] za imenovanje voditelja projekta kao zakonske kategorije u kontekstu ZPDPU

- **PMBok** – deskriptivni procesni standard koji izdaje Institut za upravljanje projektima (PMI). PMBoK vodič prepoznaje se kao globalni standard za upravljanje projektima i jedan je od najboljih i najraznovrsnijih resursa dostupnih svima koji se bave upravljanjem projektima. PMBoK-ov vodič uglavnom je usmjeren na znanja koja se očekuju od voditelja projekta kao osobe koja upravlja projektom. Sadrži 10 predmetnih skupina koje odražavaju 10 područja znanja iz PMBOK-ovog vodiča. PMI trenutačno certificira, odnosno ovjerava znanja i kompetencije sa CAPM i PMP certifikatima [21, 22, 21] koji se, kao što je spomenuto, primjenjuju u RH.
- **PRINCE2** – preskriptivni standard je akronim za “PProjects IN Controlled Environments 2”. Osnovna su mu obilježja da ima ukupno sedam načela, tema i procesa, a ključne značajke su: usredotočenost na opravdanje poslovanja; definirana organizacijska struktura tima za upravljanje projektima; pristup planiranja utemeljen na proizvodima; naglasak na podjeli projekta na upravljane i kontrolirane faze i fleksibilnost koja se može primijeniti na razini primjerenoj projektu [21, 24, 25].
- **ISO 21500** – deskriptivni standard. Po sadržaju vrlo sličan PMI-u. Definira projekt kao jedinstven proces, sastavljen od niza koordiniranih i kontroliranih aktivnosti koje imaju točno određen početak i završetak, preuzet kako bi se ostvario rezultat u skladu sa specifičnim zahtjevima unutar vremenskih, troškovnih i resursnih ograničenja [21, 26].

Odnosi i pristupi triju spomenutih standarda prikazani su na slici 3.



Slika 3. Osnovni odnosi između pristupa PMBOK, PRINCE2, ISO 2150 [21]

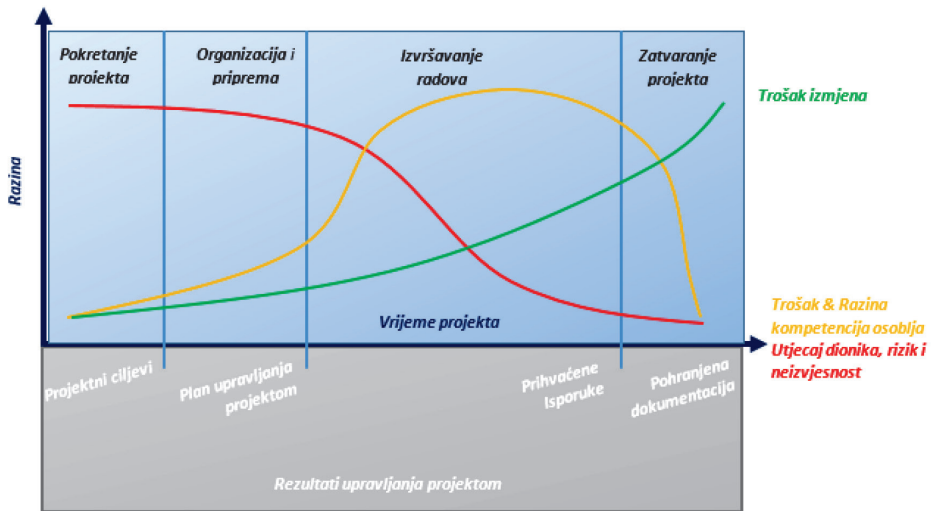
Na slici 3. prikazane su razlike i preklapanja između navedena tri standarda kako je i prethodno opisano za svaki od njih. PMBOK i ISO 21500 se više bave voditeljem projekta kao osobom, odnosno znanjima osobe i primjenom znanja. PRINCE2 se više usredotočuje na tim za upravljanje projektima i na aktivnosti tima na upravljanju projektom kao i na procese, pa ga je jednostavno prilagoditi različitim projektima i okruženjima. ISO 21500 ima najviše preklapanja sa PMBoK vodičem, ali je bez alata i tehnike. PMBoK je sveobuhvatniji od ISO 21500 i detaljnije opisuje svaki postupak.

3 Rasprava

U ovom radu prikazuje se kako sadašnja platforma unutar koje se pružaju usluge upravljanja projektom gradnje investitorima obveznicima javne nabave u Republici Hrvatskoj, kao i do sada razvijena praksa, u bitnome odstupaju od međunarodnih standarda i praksi (relevantni za razmatranje su opisani u prethodnom poglavlju). Sadašnja je praksa u RH da se uz usluge upravljanja projektom gradnje kao zakonske kategorije dispozitivno ugovaraju i druge usluge koje **suštinski nisu upravljanje projektom** (detaljnije u [3]), kao i razne druge usluge prema potrebama projekta i naručitelja, a koje nisu u suprotnosti s ograničenjima iz ZPDPU. Jedno od zakonskih ograničenja je to da se te usluge **ne mogu ugovarati unutar ugovora o stručnom nadzoru**, što je promjena u odnosu na ZPDPU iz 2015. prema kojem se nije moglo niti unutar ugovora o projektiranju [4]. No, usluge tehničkog savjetovanja, sukladno drugom primjenjivom propisu, **može pružati i stručni nadzor** jer prema Pravilniku o načinu provedbe stručnog nadzora građenja..., člankom 11 određeno je da osim poslova obavljanja stručnog nadzora, nadzorni inženjer smije obavljati i druge poslove koje mu ugovorom povjeri investitor kao što su **poslovi tehničkog savjetovanja, kontrola ispunjavanja ugovornih obveza izvođača radova prema naručitelju i poduzimanje odgovarajućih mjera za realizaciju tih obveza**, poslovi obračunavanja izvedenih radova i sl. [27]. Nadalje, u RH su u praktičnoj primjeni (posebice na EU (su)financiranim projektima) modeli ugovaranja po FIDIC-u koji također sadrže tehničko savjetovanje, ali i aktivnosti koje suštinski potpadaju pod definiciju upravljanja projektom. Provodi ih Inženjer i u praksi ih investitori obveznici javne nabave u RH po pravilu ugovaraju u sklopu ugovora o uslugama stručnog nadzora kao zakonske kategorije [28, 29].

Nadalje, iako se promjenama u ZPDPU, koje su stupile na snagu 2019. godine, na neki način uskladilo s međunarodnim standardima u pogledu određivanja obveza imenovanja voditelja projekta, odnosno ugovaranja usluga upravljanja projektom gradnje već u pripremnim fazama (faza koncipiranja projekta i prije donošenja investicijske odluke i planiranja proračunskih sredstava te radi zakonite i kvalitetne pripreme projekta te njegove uspješne provedbe inicijacije i pripreme), sadašnja je praksa da takav pristup od strane investitora obveznika javne nabave u pravilu

izostaje. Osnovne faze projekta prema PMBOK-u mogu se prikazati i grafički kao na slici 4., s mogućnosti utjecanja na projekt u korelaciji sa stupnjem rizika i troškovima tijekom različitih faza projekta [22]. Iz grafikona na slici 4. očito je da se u početnim fazama projekta, uz manje napore i manje troškove, može dobrim planiranjem racionalizirati projekt i mogu se spriječiti rizici u kasnijim fazama provedbe projekta. No, kako je već spomenuto, i dalje je prisutno nerazumijevanje većine investitora obveznika javne nabave koji takvu odredbu i dalje ignoriraju, odnosno voditelje projekata uključuju tek u fazi građenja.



Slika 4. Odnos faza projekta i mogućnosti utjecaja u korelaciji s troškovima i rizicima - PMBOK "Project Life Cycle and Organization" [22]

Vezano na spomenutu zakonsku platformu za pružanje usluga upravljanja projektom gradnje investitorima obveznicima javne nabave bitno je spomenuti da ju, uz spomenute zakone koji uređuju upravno područje gradnje, čine i ZOO kao temeljni zakon (*lex generalis*) i ZJN koji djeluje kao specijalni propis (*lex specialis*) u odnosu na ZOO. Kako ZJN ne predviđa prešutnu primjenu kodificiranih trgovačkih (poslovnih) običaja, odnosno posebnih uzanci, upravo iz spomenute karakteristike da se kod ugovora o javnim uslugama nužno ne radi o naručitelju – trgovcu, potrebna je prilagodba postojeće zakonodavne platforme da bi se primjena autonomnog izvora prava mogla učinkovito provesti.

4 Zaključak

U ovom radu analizirano je stanje područja nakon srpnja 2015., odnosno nakon stupanja na snagu ZDPUG-a koji uvjetuje ugovaranje usluge upravljanja projektima gradnje za investitore obveznike javne nabave, s osvrtom na neke od promjena koje su se do danas dogodile u pogledu Glave V. toga zakona koja uređuje područje upravljanja projektom gradnje.

U ovom radu, na osnovi pregleda relevantne literature i primjenjivih zakonskih propisa, analizirano je stanje područja, te je razmotren utjecaj relevantnih pravnih normi na aspekt djelatnosti upravljanja projektima u RH s pregledom međunarodne autonomne regulative i deskriptivnih standarda.

Sagledavajući analizirano, jasno je da postojeću praksu, u dijelu u kojem nije učinkovita i ne postiže predviđene ciljeve, treba mijenjati.

Buduća istraživanja trebaju stvoriti perspektivu za standardiziranje usluga upravljanja projektom gradnje radi učinkovitijeg upravljanja javnim novcem. Standardiziranje usluga upravljanja projektima gradnje investitora obveznika javne nabave, kroz izradu i eventualnu kodifikaciju autonomnog izvora prava, uz obvezatno poštivanje načela jedinstvenosti i otvorenosti tržišta, moguće je rješavanje identificirane problematike. Smjernice za standardiziranje uvjeta ugovora o upravljanju projektima gradnje financiranim javnim sredstvima u Republici Hrvatskoj (Smjernice) mogući je autonomni izvor prava primjenom kojih bi se omogućilo da svi kompetentni voditelji projekta, koji zadovoljavaju zakonske pretpostavke, mogu učinkovito upravljati projektom na kojem su temeljem javne nabave imenovani za voditelja projekta. Ujedno bi bilo omogućeno da, ovisno o opisu opsega posla iz natječaja, ne budu samo savjetnici i/ili tehnička pomoć kao što je to bilo dosad, već stvarni operativni voditelji projekta u skladu s internacionalnim standardima, a upravljanje projektom "po paralelnim kolosijecima" ne bi više bilo moguće. Takvom primjenom standarda ne bi se utjecalo na individualni pristup i izvrsnost u pogledu sveukupnih kompetencija pojedinog voditelja projekta.

Literatura

- [1] Zakon o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19), <https://www.zakon.hr/z/690/Zakon-o-gradnji>, (pristupljeno 10.05.2020.).
- [2] Radujković, M. i drugi: Pristup voditeljima građevinskih projekata, *Građevinar* 62, 623-631, 2010.
- [3] Perić, R.: Završni rad Smjernice za standardiziranje uvjeta ugovora o upravljanju projektima gradnje financiranim javnim sredstvima u RH, Sveučilište u Zagrebu, 2019.

- [4] Zakon o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje (NN 78/15, 118/18, 110/19), [https://www.zakon.hr/z/800/Zakon-o-poslovima-i-djelatnostima-prostornog-ure %C4 %91enja-i-gradnje](https://www.zakon.hr/z/800/Zakon-o-poslovima-i-djelatnostima-prostornog-ure%C4%91enja-i-gradnje) (pristupljeno 10.05.2020.)
- [5] Construction Extension to the PMBOK® Guide, PMI, 2016.
- [6] Pravilnik o znanstvenim i umjetničkim područjima i granama 2016 (NN br. 118/09, 82/12, 32/13, 34/16), http://www.rektorskizbor.hr/fileadmin/rektorat/O_Sveucilistu/Tijela_sluzbe/Rektorski_zbor/dokumenti/Pravilnik_o_znanstvenim_i_umjetnickim_podrucjima_poljima_i_granama.pdf (pristupljeno 7.07.2020.)
- [7] Radujković, M. i drugi: Planiranje i kontrola projekata, Sveučilište u Zagrebu, pp. 20, 2012.
- [8] Shenhar, A., Dvir, D.: Project management evolution: past history and future research directions, PMI® Research Conference: Innovations, London, Project Management Institute, 2004.
- [9] Westland J.: History of Project Management, 2018., <https://www.projectmanager.com/blog/history-project-management>, (pristupljeno 15.05.2020.).
- [10] Zakon o obveznim odnosima (NN 35/05, 41/08, 125/11, 78/15, 29/18), <https://www.zakon.hr/z/75/Zakon-o-obveznim-odnosima> (pristupljeno 15.05.2020.).
- [11] Zakon o javnoj nabavi (NN 120/2016), <https://www.zakon.hr/z/223/Zakon-o-javnoj-nabavi> (pristupljeno 15.05.2020.).
- [12] Pravilnik o dokumentaciji o nabavi te ponudi u postupcima javne nabave (NN 65/17), https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_07_65_1534.html (pristupljeno 11.05.2020.).
- [13] Goldštajn, A.: Trgovačko ugovorno pravo-međunarodno i komparativno, NN, Zagreb, 1991.
- [14] Pezo, V.: Pravni leksikon, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2006.
- [15] Bienenfeld J. i dr.: Aktualnosti građevno-tehničke regulative, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb, 2009.
- [16] Vukmir, B.: Ugovori o građenju i uslugama savjetodavnih inženjera, RRiF, 2009.
- [17] IPMA International Project Management Association: About IPMA International, <https://www.ipma.world/about-us/ipma-international/>, (pristupljeno 5.05.2020.)
- [18] IPMA Individual Competence Baseline®, ICB verzija 4.0, 2019
- [19] Hrvatska udruga za upravljanje projektima: IPMA Hrvatska, <http://capm.hr/ipma-certifikacija-i-recetifikacija/opcenito-o-ipma-certifikaciji-voditelja-projekata-programa-i-portfelja/>, (pristupljeno 5.05.2020.)

- [20] Pravilnik o potrebnim znanjima iz područja upravljanja projektima (NN 85/15), https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_08_85_1662.html, (pristupljeno 02.06.2020.)
- [21] Skogmar K.: Wite paper: "PRINCE2®, the PMBOK® Guide and ISO 21500:2012, 2015., <https://www.projectmanager.com/blog/history-project-management>, (pristupljeno 11.05.2020.)
- [22] Project Management Institute: The PMBOK A Guide to the Project Management Body of Knowledge, 6. Izdanje, 2017.
- [23] Project Management Institute: Certified Associate in Project Management (CAPM), <https://www.pmi.org/certifications/types/certified-associate-capm>, (pristupljeno 5.05.2020.).
- [24] AXELOS: Managing Successful Projects with PRINCE2®, 5. Izdanje, 2015.
- [25] ILX Group: What is PRINCE2?, <https://www.prince2.com/eur/what-is-prince2>, (pristupljeno 5.05.2020.).
- [26] ISO 21500:2012: Smjernice za upravljanje projektima - Međunarodni standard - Guidance on project management, International Organization for Standardization, ISO, 2012.
- [27] Pravilnik o načinu provedbe stručnog nadzora građenja, obrascu, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera (NN 111/14, NN 107/15, NN 20/17, NN 98/19, NN 121/19), <http://thoriumaplus.com/wp-content/uploads/2019/12/Pravilnik-o-nacinu-provedbe-strucnog-nadzora-gradenja-procisceni-tekst-NN-121-19.pdf>, (pristupljeno 12.05.2020).
- [28] Safu: Provedba ugovora o građenju, 2012., https://www.safu.hr/datastore/filestore/332/Provedba_ugovora_o_gradenju.pdf, (pristupljeno 12.05.2020.)
- [29] Elektronički oglasnik javne nabave Republike Hrvatske, Narodne novine, <https://eojn.nn.hr/Oglasnik/>

Model strujanja mora i pronosa mikroorganizama u lukama

Tin Kulić¹, doc. dr. sc. **Damir Bekić²**, prof. dr. sc. **Goran Lončar³**

¹Centar građevinskog fakulteta za projektiranje i nadzor nad gradnjom d.o.o., tin.kulic@grad.unizg.hr

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

³Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, goran.loncar@grad.unizg.hr

Sažetak

Jedan od glavnih mehanizama unosa stranih vrsta u morske luke odnosi se na ispuštanje balastnih voda što može narušiti bioraznolikost, pogoršati stanje okoliša i uzrokovati gospodarske štete. U slučaju Jadranskog mora, ispuštanje balastnih voda ubraja se među najutjecajnije mehanizme unosa stranih vrsta. U sklopu ovoga rada prezentirani su rezultati preliminarnih simulacija 3D numeričkog modela strujanja mora i pronosa pasivnih čestica za luku Ploče koji će poslužiti kao temelj za buduća mjerenja i proširenje modela za potrebe analize kretanja aktivnih čestica.

Ključne riječi: balastne vode, strane vrste, strujanje mora, pronos pasivnih čestica, numeričko modeliranje

Model of sea circulation and transport of microorganisms in ports

Abstract

One of key pathways for the spread of non-indigenous species is through discharge of ballast water, which can cause biodiversity loss, environment deterioration, and economical damage. Ballast water discharging is among the most influential causes for the non-indigenous species introduction in the Adriatic Sea. Preliminary simulations of a 3D numerical model of sea circulation and passive particle transport are presented and discussed in this paper. These results will be used as benchmark for future research and measurements, as well as for modelling behaviour of active particles.

Key words: ballast water, non-indigenous species, sea current, particle transport, numerical modelling

1 Uvod

Strane ili invazivne vrste predstavljaju članove flore i faune koji su prirodno nekarakteristični za određeno područje, a svojom pojavom i razvojem utječu na bioraznolikost, zdravlje ljudi te uzrokuju gospodarsku štetu [1]. Prema izvješću Europske agencije za okoliš [2], u razdoblju od 1949. do 2017. u europskim je morima zabilježen unos ukupno 1039 stranih vrsta, od čega je brodski promet sa 49,1 % udjela dominantan uzročnik unosa, a slijede ga izvedba kanala između mora (33,3 %), nenamjerni prijenos potencijalnih štetnika i zagađivača (11 %), migracije iz akvarija, akvakultura i marikultura (5,1 %) te namjerno ispuštanje u prirodu (1,7 %). U radu će se dati kratak osvrt na unos stranih vrsta u Jadransko more i ispuštanje balastnih voda kao značajnog mehanizma unosa (tablica 1.).

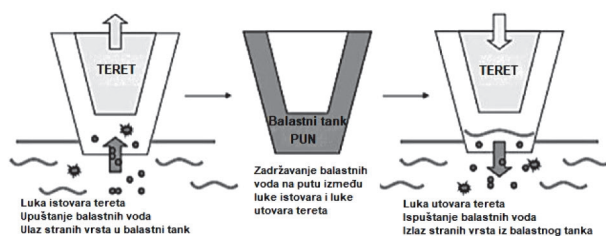
Tablica 1. Ukupan broj novounesenih invazivnih vrsta u Jadransko more za različite mehanizme unosa u razdoblju od 1970. do 2017. [2]

Mehanizam unosa	Pronos slijepih putnika – ispuštanje balastnih voda	Pronos slijepih putnika – obraštanje trupa broda	Pronos slijepih putnika – ostalo	Slučajni pronos zagađivača	Pronos putem postojećih koridora između mora	Migracije iz akvarija, akvakultura i sl.	Namjerno ispuštanje u more
Broj novih stranih vrsta 1970.-2017.	81	95	12	41	1	1	0

Osim ovoga, analizirat će se šire akvatorijalno područje luke Ploče za koju je uspostavljen 3D numerički model strujanja mora i pronosa pasivnih čestica. Pasivnim se česticama smatraju planktonske zajednice čije je gibanje inducirano isključivo morskim strujama uz mogućnost tonjenja navedenih čestica na dno, ali i nemogućnost njihovog kretanja neovisno o strujanju mora [3]. Na temelju rezultata simulacija navedenog modela planira se proširenje modela s ciljem uspostavljanja modela pronosa aktivnih i pasivnih čestica individualnih karakteristika (engl. *ABM – Agent Based Model*). Proširenjem modela, što podrazumijeva analizu kretanja aktivnih čestica, tj. mikroorganizama čije gibanje nije inducirano isključivo morskim strujama, već njihovom sposobnošću autonomnog odlučivanja o smjeru kretanja, očekuje se ostvarenje konačnog cilja u vidu implementacije takvog modela u sklopu sustava za efikasnu kontrolu i obranu luka od unosa stranih vrsta.

2 Unos stranih vrsta u Jadransko more uslijed ispuštanja balastnih voda

Balastna voda je voda s tvarima u njoj, upuštena radi postizanja zadovoljavajuće razine stabilnosti, uzdužnog i poprečnog nagiba, gaza i naprezanja broda [4]. Upuštanje balastnih voda obavlja se u lukama gdje se istovaruje brodski teret. Takve vode zadržavaju se u balastnim tankovima tijekom puta broda prema luci utovara tereta te služe kao kompenzacija mase za prethodno istovareni teret. U luci utovara tereta balastne se vode ispuštaju, pri čemu dolazi do unosa stranih vrsta u luku. Shema na kojoj je prikazana svrha i ciklus upuštanja, zadržavanja i ispuštanja balastnih voda prikazana je na slici 1.



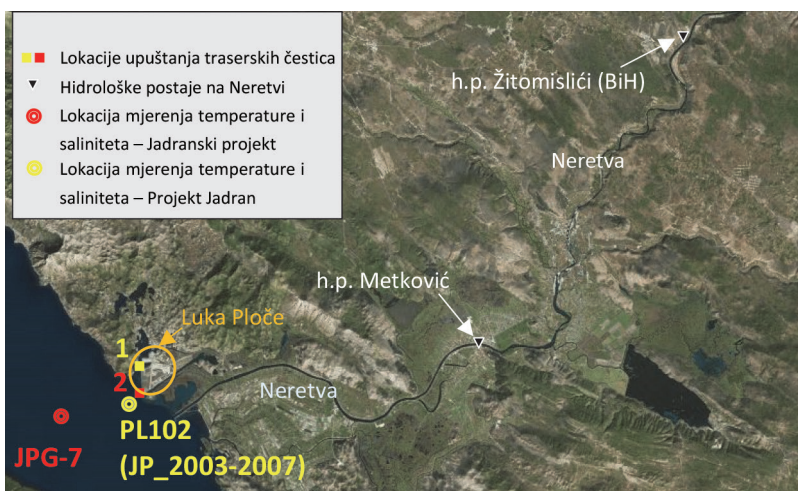
Slika 1. Shema upuštanja, zadržavanja i ispuštanja balastnih voda [5]

Prema podacima za razdoblje 2005. - 2010. prikupljenima u sklopu projekta GloBallast, prosječne godišnje količine ispuštenih balastnih voda u hrvatski dio Jadrana iznosile su između 2,18 i 2,48 milijuna m^3 , a glavne lokacije ispuštanja su luke Rijeka, Split, Šibenik i Ploče [6]. Noviji podaci otkrivaju da je tijekom 2014. i 2015. godine prosječan godišnji unos balastnih voda bio između 3,14 i 3,50 milijuna m^3 , a lokacije najznačajnijeg unosa ostale su nepromijenjene [7] u odnosu na analize provedene u sklopu GloBallast projekta. S obzirom na to da se u hrvatskim lukama odvija i međunarodni promet i trgovina, značajan je i podatak o broju zooplanktona, fitoplanktona i cista za druge međunarodne luke koji se općenito iznosi od nekoliko desetaka do nekoliko stotina tisuća pa čak i milijuna primjeraka na 1 m^3 balastne vode [8]. Nadalje, uzimajući u obzir da je, osim obraštanja trupova brodova, ispuštanje balastnih voda jedan od dva dominantna mehanizma unosa stranih vrsta u Jadransko more (tablica 1.), može se reći da je jasna motivacija za definiranje plana učinkovitijeg praćenja i upravljanja balastnim vodama te količinama unesenih stranih vrsta. U razdoblju između 2013. i 2016. godine provedbom IPA Adriatic CBC projekta BALMAS postignuta je suradnja između svih država na obalama Jadranskog mora (Republika Hrvatska, Bosna i Hercegovina, Crna Gora, Albanija, Italija i Slovenija). Glavni je cilj toga projekta bio integrirati sve potrebne aktivnosti za dugotrajno, ekološko, učinkovito i održivo provođenje mjera BWM konvencije iz 2004. godine [9]. Neki od rezultata projekta su izrada baze podataka iz sustava za kontrolu prometa, osmišljavanje platforme za GIS aplikaci-

ju, ustanovljenje nultog stanja u odabranim jadranskim lukama, početak monitoringa lučkih ekosustava, uspostavljanje sustava pravovremenog upozoravanja o izvanrednim stanjima, itd. Provedena istraživanja i rezultati tog projekta mogu se iskoristiti za daljnja istraživanja na području kontrole unosa i predviđanja kretanja stranih vrsta u lučkim akvatorijima. U sklopu ovoga rada, težište se stavlja na analizu strujanja mora i pronosa čestica u luci Ploče za potrebe koje je uspostavljen 3D numerički model.

3 Numerički model strujanja mora i pronosa pasivnih čestica

Za širi akvatorij luke Ploče uspostavljen je 3D numerički model strujanja mora i pronosa pasivnih čestica s ciljem detekcije potencijalnih zona akumulacije čestica unesenih u more na lokacijama lučkih terminala, odnosno zadržavanja broda na vezu. U kontekstu modeliranja pasivne će se čestice poistovjetiti s traserskima uzimajući u obzir da su opisane svojim optičkim i dinamičkim karakteristikama na temelju kojih je omogućeno praćenje njihovog kretanja unutar analiziranog fluida [10]. Prvotne analize provedene su uz pretpostavku da traserske čestice nisu podložne tonjenju, a potom je napravljen i odgovarajući broj simulacija u kojima su brzine tonjenja čestica usvojene s vrijednostima 0,001, 0,0005 i 0,0002 m/s. Brzine tonjenja određene su na temelju poznatih podataka o veličini planktona te ovisnosti brzine njihovog tonjenja o temperaturi i salinitetu [11]. Prema tome, pronos čestica odvija se primarno u površinskom sloju mora u kojem vjetar ima značajni utjecaj. Tok rijeke Neretve također značajno utječe na površinsko polje strujanja. Osim provedene numeričke analize polja brzine strujanja, provedena je i numerička analiza konvektivno - disperzivnog pronosa pasivnih čestica upuštenih na nekoliko uobičajenih lokacija broda na vezu lučkih terminala. Lokacije upuštanja označene su žutim i crvenim kvadratom s pripadnim brojkama 1 i 2, redom, što je vidljivo na situaciji promatranog područja (slika 2.).

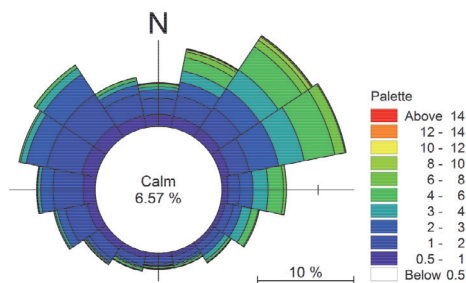


Slika 2. Situacija promatranog područja

3.1 Ulazni podaci

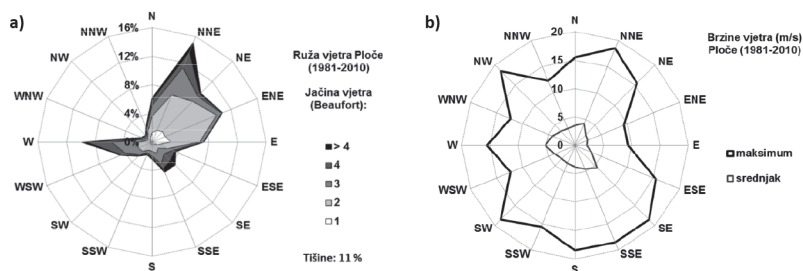
3.1.1 Vjetar

Na slici 3. prikazana je ruža vjetrova dobivena na temelju rezultata numeričkog atmosferskog modela ALADIN - HR s pripadnim središnjim smjerovima N (raspon 337,5 - 22,5) , NE (raspon 22,5 - 67,5), E (raspon 67,5 - 112,5), SE (raspon 112,5 - 157,5), S (raspon 157,5 - 202,5), SW (raspon 202,5 - 247,5), W (raspon 247,5 - 292,5) i NW (raspon 292,5 - 337,5) za lokaciju luke Ploče u razdoblje 1992. - 2001. [9].



Slika 3. Ruža vjetrova za relative učestalosti trosatne brzine vjetra

Za razdoblje od 1981. do 2010. prikazana je na slici 4. ruža vjetrova za meteorološku postaju Ploče. Najveću učestalost ima bura, odnosno vjetrovi sjeveroistočnog kvadranta NNE, NE i ENE smjera koji se ukupno javljaju u 36 % terminskih podataka (slika 4.).



Slika 4. Ruža vjetrova (lijevo), maksimumi i srednjaci (desno) brzina vjetra na meteorološkoj postaji Ploče u razdoblju 1981. - 2010.

3.1.2 Protok i temperatura rijeke Neretve

Rijeka Neretva je regulirana pri čemu nema prirodni režim otjecanja uslijed upravljanja radom postojećih hidroelektrana, a prva hidrološka postaja (dalje u tekstu: h.p.), nakon koje nema značajnih pritoka ni regulacije protoka, je h.p. Žitomislići [13]. Na raspolaganju su podaci o dnevnom režimu protoka i temperature rijeke Neretve na h.p. Žitomislići za razdoblje 2007. - 2014. godine, te na h.p. Metković za razdoblje 2015. - 2018. Lokacije postaja prikazane su na situaciji promatranog područja (slika 2.). Na temelju raspoloživih podataka o protoku utvrđeno je da se maksimalni protoci javljaju tijekom zime, ranog proljeća ili kasne jeseni, a minimalni su protoci zabilježeni u ljetnim mjesecima.

3.1.3 Temperatura i salinitet mora

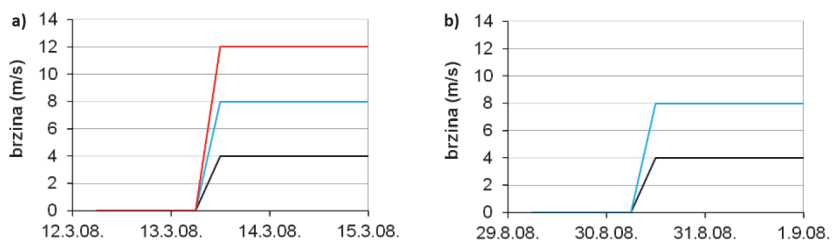
Lokacije postaja na kojima je bilježena temperatura i salinitet mora u sklopu recentnih nacionalnih programa monitoringa prikazane su na situaciji promatranog područja (slika 2.). Na postaji JPG - 7 mjereni su vertikalni profili temperature i saliniteta mora u pet termina tijekom provedbe *Jadranskog projekta* u razdoblju 2007. - 2008. [14], a na postaji PL102 mjerene su temperatura i salinitet mora u površinskom sloju mora, na dubinama 5 i 10 m, te u pridnom sloju na dubini 18 m u razdoblju od 2003. do 2007. tijekom provedbe *Projekta Jadran*.

3.2 Skup simulacija

Na temelju dostupnih podataka o vjetru te podataka o protoku Neretve zaključeno je da se modelom strujanja mora trebaju obuhvatiti oceanografski uvjeti karakteristični za "kasnojесensko/zimsko/ranoproljetno" (dalje u tekstu: *zimsko*) razdoblje (odsutnost stratifikacije u zoni otvorenog mora), te oceanografski uvjeti s prisutnom stratifikacijom vodnog stupca na cijelom području modelske domene (*ljetno* razdoblje). Numeričkim su modelom analizirane situacije karakterističnih protoka Neretve u iznosu od 100 m³/s (95 % trajanje na h.p. Metković za razdoblje 2015. - 2018.), 500 m³/s (15 % trajanje na h.p. Metković za razdoblje 2015. - 2018.) te 1400 m³/s. Zadnja u tom nizu navedena vrijednost protoka usvojena je kao mjerodavna vrijednost maksimalnog protoka za *zimsko* razdoblje, pri čemu je stvarno izmjerena vrijednost na h.p. Metković za analizirano razdoblje iznosila 1357 m³/s (21.3.2018.). Rezultati mjerenja temperature i saliniteta mora korišteni su u sintezi rubnih uvjeta za skalarna polja na otvorenoj granici mora.

Numeričke simulacije strujanja mora i pronosa pasivnih čestica provedene su tijekom tri dana u *zimskom* i *ljetnom* režimu oceanografskih i atmosferskih uvjeta. Za *zimске* uvjete usvojeno je formalno razdoblje numeričkih simulacija 12. do 15. ožujka 2008., a za *ljetne* uvjete usvojeno je razdoblje 29. kolovoza 2008. - 1. rujna

2008. Nadalje, u simulacijama *zimskog* razdoblja (12. do 15. ožujka 2008.) djelovanje vjetra modelirano je homogenim i nestacionarnim poljem vjetra sa središnjim smjerovima N, NE, E, SE, S, SW, W, NW i maksimalnim brzinama vjetra 4 m/s (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), 8 m/s (NE, E, SE, S, SW, W, NW) i 12 m/s (NE, SE, S, SW, W), postavljenim za nastup u formalnom terminu 13. ožujka 2008. (1 dan nakon početka simulacije 12. ožujka 2008., slika 5.a). Ista metodologija korištena je i u sklopu simulacija za *ljetno* razdoblje (29. kolovoza 2008. - 1. rujna 2008., slika 5.b) izuzev analize maksimalne brzine vjetra od 12 m/s.



Slika 5. Vremenska serija brzine vjetra za a) "zimsko" i b) "ljetno" razdoblje

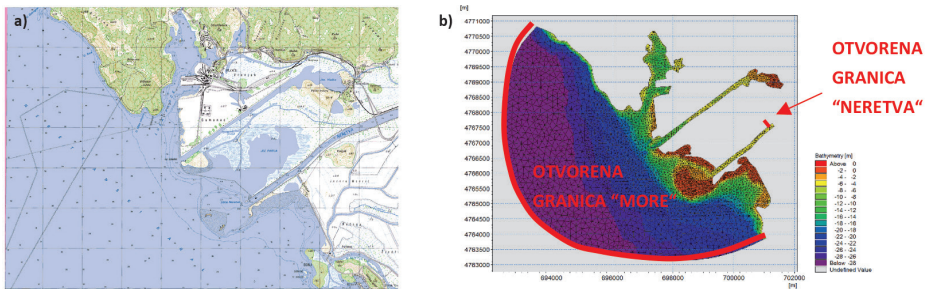
Od ukupno 128 provedenih simulacija, u tablici 2. prikazan je primjer nekoliko simulacija za različite ulazne parametre.

Tablica 2. Nomenklatura provedenih numeričkih simulacija

R.br.	Razdoblje	Protok rijeke Neretve Q [m ³ /s]	Vjetar -smjer (brzina)	Izvor čestica (slika 2.)	Tonjenje pasivnih čestica [m/s]
2	12.3.-15.3.	500	-	1, 2	0
14		500	SE (4 m/s)	1, 2	0
53		1400	NE (12 m/s)	1, 2	0
107		varijabilno (vremenska serija polusatnih protoka na h.p. Žitomislići u razdoblju 12.3. - 15.3.2008.)	varijabilno (vremenska serija brzine i smjera vjetra na temelju rezultata ALADIN-HR modela u razdoblju 12.3. - 15.3.2008.)	1, 2	0,0005

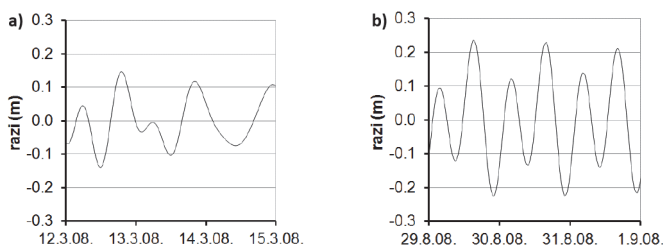
3.3 Uspostavljanje numeričkog modela strujanja mora i pronosa pasivnih čestica

Batimetrijska podloga dobivena je na temelju nautičkih karata u mjerilu 1:25000 (www.navionics.com) te primjenom bilinearne interpolacije za lokacije numeričkih čvorova na kojima nema definiranih dubina. Otvorene granice modela prikazane su linijama crvene boje, a krute granice odgovaraju kontaktnoj liniji akvatorijalnog dijela s linijom prirodne ili umjetne obale. Te su granice nepropusne i kroz njih nema fluksa polja brzina. Modelska prostorna domena diskretizirana je nestrukturiranom mrežom konačnih volumena (slika 6.b). Prostorni inkrement između numeričkih čvorova, smještenih u težištu konačnih volumena varira između 15 m u blizini obalne crte i 150 m na području najvećih dubina. U vertikalnom smjeru za oba modela korišten je 1 sigma sloj debljine 1 m te ispod njega "z" koordinata s debljinom ćelija od 2 m.



Slika 6. Luka Ploče – a) akvatorijalno područje, b) prostorna domena numeričkog modela

Na otvorenoj granici "MORE" (slika 6.b) definiran je rubni uvjet u obliku vremenske serije morskih razina izračunanih na temelju realnih podataka o amplitudama i fazama sedam osnovnih konstituenata plimnog signala (slika 7.).



Slika 7. Vremenski niz relativnih morskih razina korišten za rubni uvjet na otvorenoj granici numeričkog modela "MORE" za razdoblja a) 12. do 15. ožujka 2008.; b) 29. kolovoza do 1. rujna 2008. [15]

U profilu navedene otvorene granice korištena su nestacionarna polja temperature i saliniteta mora dobivena na temelju mjerena CTD sondom na postajama JPG - 7 u terminima 12. ožujka 2008. i 29. kolovoza 2008. Za početne uvjete temperature i saliniteta mora u simulacijama za razdoblje 12. do 15. ožujka 2008. korištene su izmjerene vertikalne razdiobe u terminu 12. ožujka 2008., a za početne uvjete temperature i saliniteta mora u simulacijama za razdoblje 29. kolovoza - 1. rujna 2008. Na otvorenoj granici "NERETVA" korišteni su protoci rijeke Neretve od 100, 500 i 1400 m³/s. Temperatura Neretve usvojena je kao konstantna vrijednost 10.2 °C za razdoblje 12. do 15. ožujka 2008., te kao vrijednost 18,5 °C za razdoblje 29. kolovoza - 1. rujna 2008. Obje vrijednosti temperature dobivene su ne temelju određivanja srednjih vrijednosti dnevnih temperatura rijeke Neretve na h.p. Žitomislići zabilježenih u dvama razdobljima za koja su provedene simulacije. Salinitet Neretve usvojen je s vrijednosti 0 PSU.

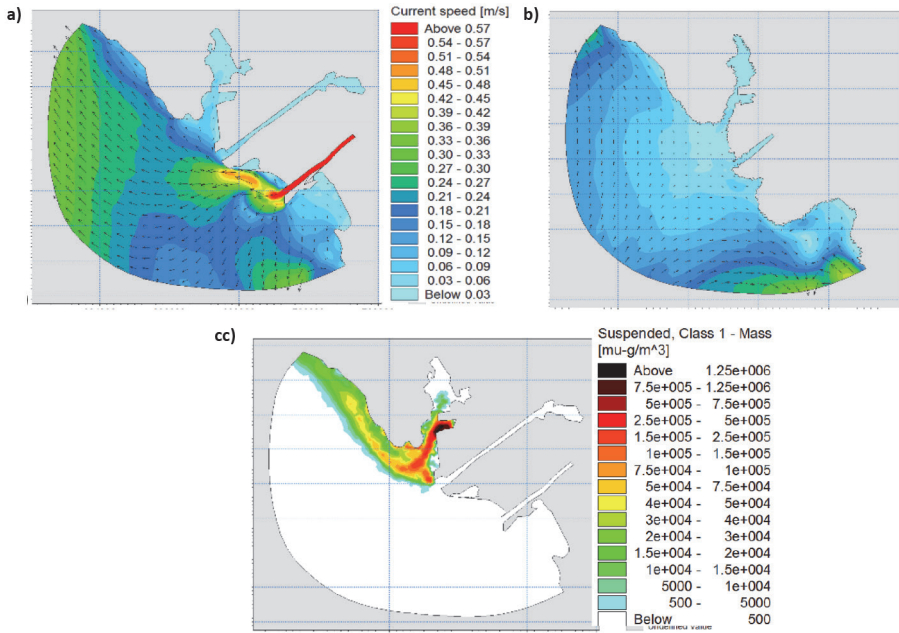
Na kontaktu mora i atmosfere primijenjeno je polje brzine vjetra, pri čemu je za koeficijent trenja usvojena vrijednost 0,0016 [16]. Zatvaranje modela turbulencije oslanja se na $k - \epsilon$ formulaciju [17] u vertikalnom smjeru i Smagorinskyjev koncept [18] u horizontalnom smjeru. Koeficijenti turbulentne disperzije za skalarna polja temperature i saliniteta definirani su faktorima proporcionalnosti (Prandtllov broj) 0,9 u vertikalnom smjeru i 0,12 u horizontalnom smjeru. Faktori proporcionalnosti za polja turbulentne kinetičke energije (TKE) i disipacije (ϵ) usvojeni su s vrijednostima 1 (TKE) i 1.3 (ϵ) u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Hrapavost i Smagorinskyjev koeficijent u modelu su usvojeni kao prostorno homogeni s vrijednostima 0,01 m i 0,2. Toplinska izmjena s atmosferom nije uzeta u obzir. U nastavku su dani detaljni opisi rubnih i početnih uvjeta za pojedini model.

Izračunana polja brzine strujanja u sklopu hidrodinamičkog dijela numeričkog modela osnova su za daljnji proračun pronosa pasivnih čestica mehanizmom konvektivne disperzije. Pasivne čestice nisu podložne reaktivnom procesu degradacije. Konvektivno - disperzivna komponenta pronosa uspostavljena je primjenom Lagrangeovog modela diskretnih čestica. Konvektivna komponenta oslanja se na rezultate strujanja, a turbulentna disperzija definirana je kao slučajna i neovisan Markovljev proces [19]. Diskretni pomaci čestica izračunavaju se metodom slučajnog koraka rješavanjem sustava Fokker - Planckovih i Langevinovih jednadžbi [20].

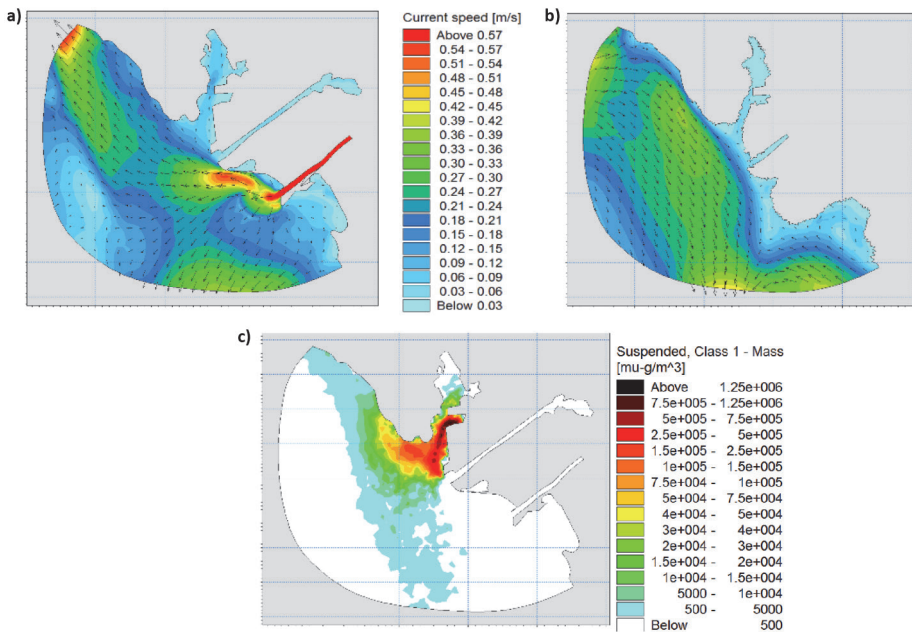
Izvori pasivnih čestica postavljeni su na lokacijama 1 i 2 (slika 2.) i dubini - 2 m, te s intenzitetom masenog fluksa od 0,033 kg/s. Početak unosa čestica je 48 sati nakon početka simulacije (14. ožujka i 31. kolovoza).

3.4 Rezultati numeričkog modela

Navest će se primjeri rezultata dviju simulacija s komentarima. Odabrane su dvije simulacije u "zimskom" razdoblju (12. - 15. ožujka) za protok rijeke Neretve od 500 m³/s, bez djelovanja vjetra te bez tonjenja pasivnih čestica (tablica 2., simulacija 2) te za protok Neretve od 500 m³/s, s djelovanjem SE vjetra brzine 4 m/s te bez tonjenja pasivnih čestica (tablica 2., simulacija 14).



Slika 8. Satno usrednjena polja brzina strujanja za a) površinski sloj; b) dubinu od - 8 m; c) polja koncentracije traserskih čestica za zadnji sat simulacije 2 (tablica 2.)



Slika 9. Satno usrednjena polja strujanja za a) površinski sloj; b) dubinu -8 m; c) polja koncentracije traserskih čestica za zadnji sat simulacije 14 (tablica 2.)

Na temelju prikazanih rezultata za stacionarne uvjete okoliša (protok Neretve, brzina i smjer vjetra, temperatura i salinitet mora) u "zimskom" razdoblju, u kojima nema tonjenja pasivnih čestica niti prisustva vjetra, primijećeno je da se oblak "onečišćenja" za protok Neretve od 500 m³/s širi u smjeru NW. Za isti protok Neretve i iste okolišne uvjete uz prisutnost SE vjetra brzine 4 m/s dolazi do širenja oblaka onečišćenja u smjeru NW i S. Iz preostalih simulacija, u kojima tonjenje čestica nije uzeto u obzir, a nisu prikazane u sklopu ovoga rada, uočeno je da porast protoka Neretve uzrokuje umanjenje koncentracije oblaka onečišćenja kada vjetar nije prisutan. U sklopu simulacija, u kojima je tonjenje čestica uzeto u obzir i nema djelovanja vjetra, dolazi do raspršenja čestica unesenih na lokaciji 2 uslijed djelovanja toka rijeke Neretve, a za čestice unesene na lokaciji 1 taloženje je prisutno u neposrednoj blizini od mjesta upuštanja.

4 Zaključak

Jedan od glavnih mehanizama unosa stranih vrsta na područjima lučkih akvatorija jest ispuštanje balastnih voda u lukama utovara tereta, što posljedično može narušiti bioraznolikost, pogoršati stanje okoliša i, u konačnici, uzrokovati pojavu ekonomskih šteta. S obzirom na to da se u lukama Jadranskog mora odvija međunarodni promet, može se reći da je opasnost od unosa stranih vrsta uslijed ispuštanja balastnih voda prisutna. Štoviše, na temelju dostupnih podataka uočeno je da je upravo ispuštanje balastnih voda, osim obraštanja trupa broda, jedan od dva najznačajnija mehanizma unosa stranih vrsta na području luka Jadranskog mora (tablica 1.).

U sklopu ovoga rada prikazani su rezultati dviju preliminarnih simulacija 3D numeričkog modela strujanja mora i pronosa pasivnih čestica za šire akvatorijalno područje luke Ploče. Na temelju provedenih simulacija za stacionarne uvjete okoliša zaključeno je da, u slučaju istog protoka rijeke Neretve i bez tonjenja čestica, prisutnost vjetra potiče širenje oblaka onečišćenja od mjesta upuštanja traserskih čestica (slike 8. i 9.). Rezultati preliminarnih simulacija poslužit će za potrebe definiranja lokacije postavljanja uređaja za mjerenje brzine strujanja mora (ADCP) unutar luke Ploče. Ta će se mjerenja iskoristiti za potrebe kalibracije modela, a provedene simulacije poslužit će za daljnja istraživanja. Pri tome će se u obzir uzeti i širenje aktivnih čestica za koje se očekuje širenje neovisno o djelovanju morskih struja i valova posebice u uvjetima manjih brzina strujanja te, u ovom slučaju, protoka Neretve.

Zaključno, osim akvatorijalnog područja luke Ploče, planirano je proširenje istraživanja na luku Rijeka zajedno s postavljanjem ADCP - a i uspostavljanjem 3D numeričkog modela cirkulacije mora i pronosa aktivnih i pasivnih čestica, a sve sa svrhom prognoziranja unosa i širenja stranih vrsta.

Literatura

- [1] Zakon o zaštiti prirode NN 80/2013, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_06_80_1658.html
- [2] European Environment Agency, Pathways of introduction of marine non-indigenous species to European seas, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/trends-in-marine-alien-species-1/assessment>
- [3] Lalli, C.M., Parsons, T.R.: Biological Oceanography An Introduction Second Edition. 0 7506 3384 0, Elsevier Butterworth - Heinemann, 1993.
- [4] Pravilnik o upravljanju i nadzoru balastnih voda NN 128/12, <http://www.propisi.hr/print.php?id=12003>
- [5] Szczepanek, M., Behrent, C.: Assessment of selected on-board ballast water treatment system in terms of technical and operation parameters, New trends in production engineering (2018.) 1, pp. 461 - 467
- [6] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture: Procjena statusa upravljanja balastnim vodama u Republici Hrvatskoj, 2011.
- [7] Čović Bajramagić, M., Vukić, L., Slišković, M.: Analysis of ballast water quantity and type of cargo in main ports of Croatia for 2015., 7th International Maritime Science Conference, Solin, pp. 481 - 486, 2017.
- [8] Gollasch, S., Rosenthal, H.: Transfer of Non-Indigenous Aquatic Species Concern Aquatic Resource Users (Chapter), Oceans and Aquatic Ecosystems – Volume II, (ur. Wolanski, E.), Eols Publishers Co. Ltd., Oxford, pp. 151 - 170, 2009.
- [9] International Maritime Organization: The International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, 2004.
- [10] Emrich, R.J.: Fluid Dynamics – Volume 18B, (ur. Emrich, R.J.), Academic Press, London, pp. 6 - 7, 1981.
- [11] Bienfang, P.K., Szyper, J.P.: Effects of Temperature and Salinity on Sinking Rates of the Centric Diatom *Ditylum brightwellii*, Biological Oceanography (1982.) 1:3, pp. 211 - 223
- [12] Ocvirk, E.: Optimizacija nasipnih zaštitnih građevina u uvjetima ekstremne jadranske valne klime, disertacija, 2010.
- [13] Federalni hidrometeorološki zavod BiH: Hidrološki godišnjaci za razdoblje 2004. - 2012., <http://www.fhmzbih.gov.ba/latinica/P-hidro.php>
- [14] Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet: Vertikalni profili temperature i saliniteta mora u akvatoriju Neretljanskog kanala, Program praćenja stanja Jadranskog mora, 2010.

- [15] HHI: Izvešće o mjerenjima na mareografskoj postaji u razdoblju od ožujka 2002. do ožujka 2003. godine, 2003.
- [16] Wu, J.: The sea surface is aerodynamically rough even under light winds, *Boundary layer Meteorology*, pp. 149 - 158., 1994.
- [17] Rodi, W.: Examples of Calculation Methods for Flow and Mixing in Stratified Fluids, *Journal of Geophysical Research*, pp. 5305 - 5328, 1987.
- [18] Smagorinsky, J.: Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities, In: *Large eddy simulations of complex engineering and geophysical flows*, (ur. B. Galperin, S. Orszag), Cambridge University Press, pp. 1 - 34, 1993.
- [19] Gardiner, C.W.: *Handbook of stochastic methods for Physics Chemistry and Natural Science*, Springer - Verlag. Berlin, 409 pp., 1985.
- [20] Kloeden, P.E., Platen, E.: *Numerical Solution of Stochastic Differential Equations*, Springer - Verlag, Berlin, 636 pp., 1999.

Procjena amplifikacije seizmičke pobude za slučaj potresa u Albaniji 26. studenoga 2019.

Adrian Kadiri¹, doc. dr. sc. Mario Bačić²

¹Doktorand, adriankadiri6@gmail.com

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mario.bacic@grad.unizg.hr

Sažetak

Na oštećenja nastala na nekoj lokaciji, osim intenziteta potresa i udaljenosti od epicentra potresa, utječu i parametri lokalnog tla. Zbog velike razlike u impedanciji između osnovne stijene i mekog površinskog sloja, dolazi do pojave amplifikacije seizmičke pobude. U ovom radu analizirana je veličina amplifikacije temeljnog tla za slučaj potresa koji je 26. studenoga 2019. zadesio Albaniju. Analiza je provedena ekvivalentno-linearnom metodom koristeći program DEEPSOIL. Za potrebe analize, nelinearnost tla je obuhvaćena empirijskim krivuljama redukcija $G/G_0 - \gamma$ i $D - \gamma$.

Ključne riječi: amplifikacija potresne pobude, dinamički parametri tla, DEEPSOIL, ekvivalentnolinearna analiza, prigušenje tla

Estimation of ground motion amplification for the case of Albania earthquake 26th November 2019

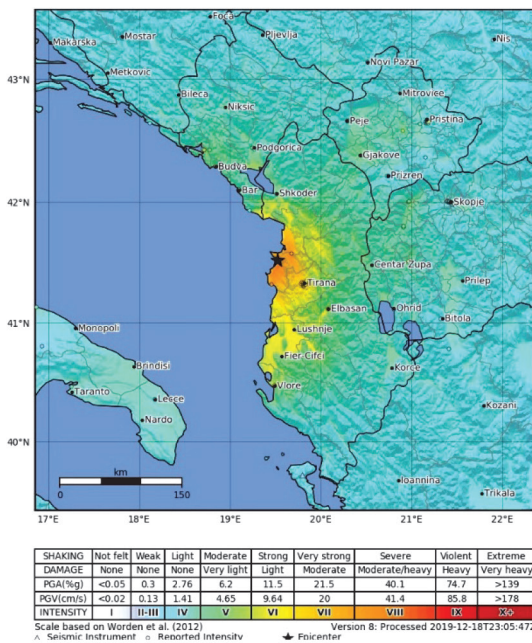
Abstract

In addition to earthquake intensity and distance from the epicentre, the damage caused at a particular location is also affected by local soil parameters. The amplification of seismic excitation occurs due to large difference in impedance between the bedrock and soft surface layers. In this paper, the amplification magnitude is analysed for the earthquake that struck Albania on 26 November 2019. The analysis is based on the equivalent-linear method using the DEEPSOIL software. For the analysis purposes, soil nonlinearity is described using the empirical reduction curves $G/G_0 - \gamma$ and $D - \gamma$.

Key words: amplification of ground motion, dynamic soil parameters, DEEPSOIL, equivalent-linear analysis, soil damping

1 Uvod

Utjecaj potresa na stabilnost zgrada ovisi ne samo o intenzitetu potresa i udaljenosti od epicentra, već i o mnogim drugim faktorima kao što su: geološka građa i lokalni uvjeti tla, prirodni period vibracije građevina, itd. Seizmičke stanice mjere seizmičke pobude (ubrzanje, brzinu itd.) na površini tla. Međutim, seizmičke vibracije mogu znatno promijeniti svoja svojstva putujući iz većih dubina prema površini. U slučaju mekih površinskih sedimenata, dolazi do amplifikacije seizmičke pobude. Jugoistočna Europa je 2019. i 2020. godine pogođena nizom uzastopnih potresa, među kojima je i potres koji je 26. studenoga 2019. zadesio Albaniju. Potres magnitude $M_w=6,4$ s epicentrom 22 km od grada Drača i dubine 22 km, dogodio se kao posljedica potiska u blizini konvergentne granice ploča Afrike i Euroazije. Rješenja za fokusne mehanizme upućuju na obrnuto klizanje na plitkom ili strmom rasjedu. Obrtanje rasjeda sjeverozapad-jugoistok u skladu je s tektonikom regije. Na mjestu ovog događaja afrička ploča konvergira s euroazijskom pločom brzinom 73 mm/god [1]. U navedenom potresu smrtno je stradala 51 osoba, a znatno je oštećeno 2365 zgrada na potezu Drač - Tirana.



Slika 1. Karta Albanije koja pokazuje mjesta i intenzitete potresa 26. studenoga 2019. [1]

U radu je primijenjena ekvivalentnolinearna metoda za procjenu veličine amplifikacije seizmičke pobude navedenog potresa, za područje centra grada Tirane, glavnog grada Albanije.

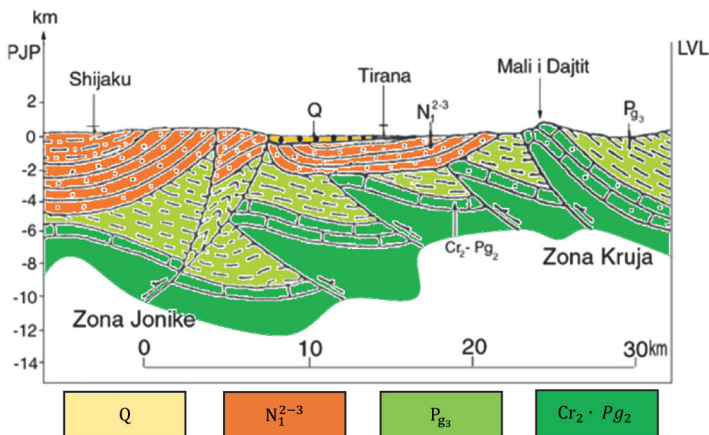
2 Geološka građa grada Tirane

Grad Tirana nalazi se u periadriatskoj depresiji, desno na najjužnijem ravničarskom dijelu tiranske sinklasne molase. Tiranska sinklina, dugačka oko 80 km i široka 10 - 12 km, predstavlja asimetričnu sinklinu s jakim spuštanjem do preokrenutog zapadnog boka i lagano uranjanjem istočnog boka. Nalazi se na naslagama molase srednjeg, gornjeg miocenskog doba, a dijelom pliocenske molase u najsjevernijem dijelu.

Miocenski molas se postavlja transgresivno i s neskladnošću na karbonatno-flišne strukture jonske zone i zone grada Kruje. Samo na istočnom boku sinčrinske linije Tirane uočeno je transgresivno i neskladno postavljanje miocenske molase preko oligocenskog fliša zone Kruje.

Serravalski sedimenti, debljine oko 600 m, predstavljeni su litotamnijskim i organogenim vapnencima u donjem dijelu geološkog presjeka, koji prelaze prema gore u gline i pješčenjake. Tortononski sedimenti karakterizirani su glinama koje prelaze prema gore u gline-pješčenjake, debljine 100 - 2000 m.

Kvartarni sedimenti predstavljeni su šljuncima isprepletenim glinovitim i pjeskovitim slojevima. U gradu Tirani, debljine su oko 15 - 20 m, a prema sjeveru do približno 200 m u blizini rijeke Mati [2].

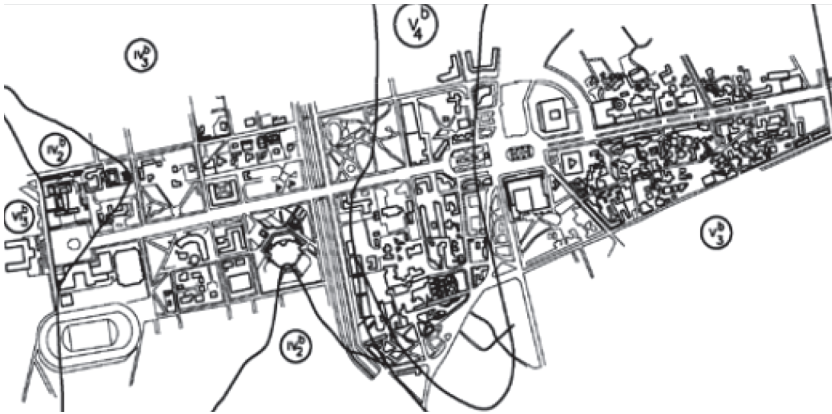


Slika 2. Geološki presjek planine Shijak-Dajti [2], Q – kvartarni sedimenti predstavljeni uglavnom крупnim šljuncima u kombinaciji sa slojevima gline i pijeska, N_1^{2-3} – neogenski depoziti, uglavnom litotanijskim i organogenim vapnencima, kombinacija pješčenjaka i alevrolite gline, Pg_2 – uglavnom fliši zone Kruje, Cr_2-Pg_2 - vapnenac

S inženjersko-geološkog aspekta, središte grada Tirane karakteriziraju četiri zone, od kojih III i V zona pripadaju drugoj terasi rijeke Tirane, zona IV pripada prvoj terasi,

dok VI zona pripada stijenama gornje miocenske molase. Za potrebe analize razmotrit će se zona V. U inženjersku geološku zonu V uključena je druga terasa rijeke Tirane, koja slijedi duž središta grada Tirane od željezničke stanice do rijeke Lane. Ova se zona također dijeli na dvije podzone [3, 4]:

- podzona V^a s pjeskovitom podlogom,
- podzona V^b s glinovito-prahovitom podlogom.



Slika 3. Područje središta Tirane i položaj geotehničkih modela tog dijela grada [3, 4]

3 Lokalni uvjeti tla

Za središte Tirane je razvijeno nekoliko geotehničkih modela (slika 3). Za potrebe analize koristit će se geotehnički model V₄^b, čiji su parametri predočeni u tablici 1.

Tablica 1. Parametri tla geotehničkog modela V₄^b [3, 4]

Sloj tla	Debljina sloja [m]	ρ [T/m ³]	IP [%]	V_s [m/s]	G_0 [MPa]	E_0 [MPa]
1	2	1,47	15	190	53,07	141,17
2	2	1,67	15	290	140,45	373,60
3	4	1,83	15	430	338,36	900,04
4	13	1,93		500	482,50	1283,45
5		2,15		800	1376	3302,4

Naziv sloja:
 1, nasip, 2, anorganski prah i dobrograđuirani pijesak, 3, mješavina praha sa šljunkom i pijeskom, 4, šljunak, 5, stijenska podloga

Dinamički parametri tla potrebni za analizu seizmičke pobude ekvivalentnolinearnom metodom jesu modul posmika pri malim deformacijama (G_0) i funkcije redukcije $G/G_0 - \gamma$ te $D - \gamma$, koje opisuju odnos modula posmika i posmične deformacije, odnosno odnos prigušenja i posmične deformacije.

Modul posmika pri malim deformacijama (G_0) određen je izrazom:

$$G_0 = V_s^2 \cdot \rho \quad (1)$$

gdje su:

V_s - brzina širenja posmičnih valova

ρ - gustoća tla.

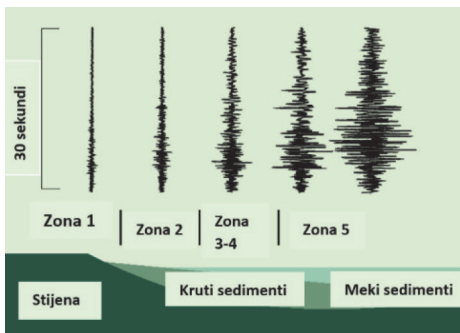
Youngov modul elastičnosti E se računa koristeći modul posmika G iz jednadžbe (1):

$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu) \quad (2)$$

S obzirom na to da za promatranu lokaciju nisu poznate vrijednosti Poissonovog koeficijenta za slojeve tla, da bi se provela analiza trebale su vrijednosti od $\nu = 0,33$ za svaki sloj tla, osim za stijenu čija je vrijednost $\nu = 0,20$ [5]. Za procjenu krivulja redukcije $G/G_0 - \gamma$ te $D - \gamma$, program DEEPSOIL nudi empirijske aproksimacije tih funkcija na temelju koeficijenta plastičnosti (IP) i efektivnog vertikalnog naprezanja (σ_v') te su one korištene u analizama [6, 7].

4 Amplifikacija seizmičke pobude

Parametri temeljnog tla, osim intenziteta potresa vrlo su bitni kada je u pitanju stabilnost neke konstrukcije pri djelovanju potresa. Primjer amplifikacije seizmičke pobude od osnovne stijene do površine terena prikazan je na slici 4. [8].



Slika 4. Primjer utjecaja lokalnih uvjeta tla na amplifikaciju seizmičke pobude od osnovne stijene do površine terena [8]

Amplifikacija seizmičke pobude je posljedica razlike u impedanciji između mekog površinskog sloja i osnovne stijene, zbog zarobljavanja seizmičke energije. Impe-

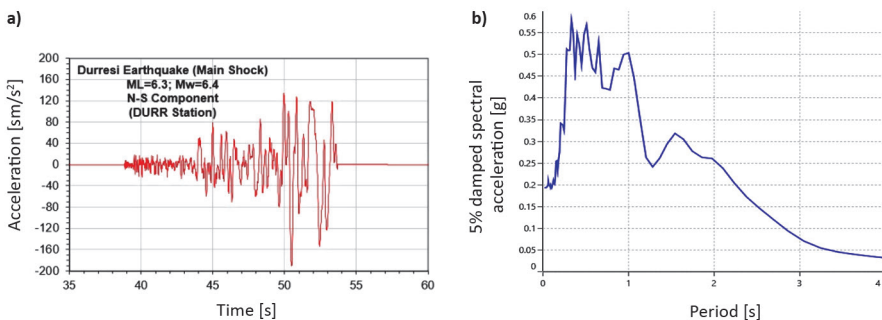
dancija tla je otpor titranju čestice tla [9] i definira se kao umnožak gustoće tla i brzine širenja transversalnih valova.

$$A_0 = C = \frac{v_{\text{tem.stijene}} \cdot \rho_{\text{tem.stijene}}}{v_{\text{površine}} \cdot \rho_{\text{površine}}} \quad (3)$$

Amplituda vibracije tla za vrijeme potresa može se povećati ili smanjiti ovisno o geološkoj strukturi tla (debljina sedimenta, dubina od osnovne stijene, razina podzemne vode, itd) kroz koju seizmički valovi putuju. Na amplifikaciju seizmičke pobude utječe i prigušenje amplitude valova uzrokovano neelastičnošću i heterogenošću sustava [9].

5 Ulazna seizmička pobuda

Ubrzanja tla uslijed seizmičke pobude 26. studenoga 2019., izmjerena su na površini terena. Zapisi potresa pokazuju vrijednost maksimalnog ubrzanja površine tla od 0,19g (slika 5.a), dok je izračunano maksimalno spektralno ubrzanje od 0,558g za horizontalnu komponentu istok-zapad, 0,579g za horizontalnu komponentu sjever-jug (slika 5.b) i 0,462g za vertikalnu komponentu. Budući da je najveće ubrzanje iz horizontalne komponente sjever-jug, ona će se i koristiti u ovoj analizi. Pri tome je važno naglasiti da je od strane autora objavljenih akcelerograma zabilježenih na površini terena pretpostavljeno prigušenje tla od 5 %, koja se često koristi u literaturi za određivanje elastičnih spektara odziva [10].



Slika 5. Akcelerogram zabilježen na površini terena: a) izračunani elastični spektralni odzivi potresa 2019 god. u Albaniji (S-J komponenta) za 5 % prigušenja; b) [11]

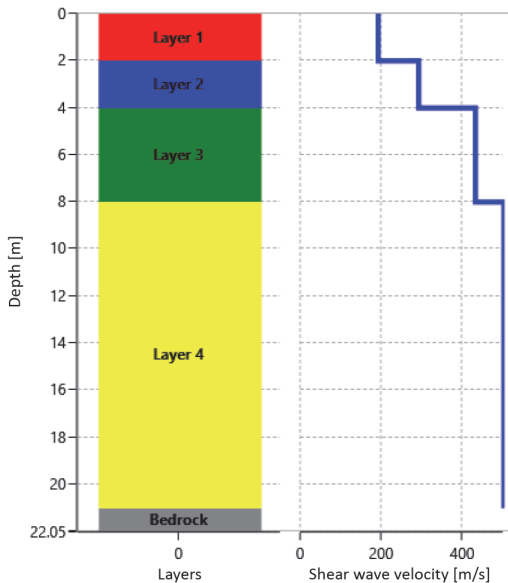
Prije početka analize izvedena je dekonvolucija seizmičke pobude s površine terena (vrha modela) na dno modela (osnovnu stijenu). Dekonvolucija je proces koji procjenjuje seizmičku pobudu na dubini profila tla, koji se zatim može koristiti kao ulazna seizmička pobuda. U ovom radu se dekonvolucijom nastojala odrediti seizmička po-

buda na razini osnovne stijene. Dekonvolucija je proces kojim se dobiva "izvorna" seizmička pobuda (na razini osnovne stijene) iz one zabilježene na površini terena. Takva seizmička pobuda dobivena na razini osnovne stijene može se koristiti u računalnim programima u kojima se ulazna seizmička pobuda može zadati samo na dno numeričkog modela. U programu DEEPSOIL, ulazna seizmička pobuda može se zadati na vrh bilo kojeg sloja tla [12]. Dobivena seizmička pobuda na razini osnovne stijene nakon dekonvolucije, služiti će inverzno kao pokazatelj amplifikacije seizmičke pobude.

6 Modeliranje problema

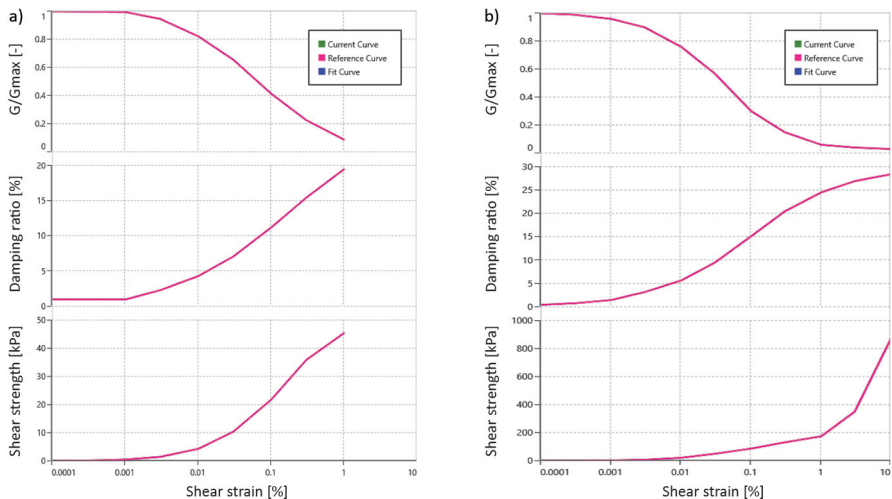
Analiza amplifikacije seizmičke pobude provedena je 1-D ekvivalentnolinearnom metodom. Nelinearnost tla opisana je pretpostavljenim krivuljama $G/G_0 - \gamma$ te $D - \gamma$. Korišten je program DEEPSOIL v.7.0. DEEPSOIL je program za jednodimenzionalnu analizu seizmičke pobude koji može izvesti: 1-D nelinearnu vremensku analizu s generiranjem pornog tlaka i bez njega, 1-D ekvivalentnolinearnu frekvencijsku analizu uključujući konvoluciju i dekonvoluciju seizmičke pobude i 1-D linearne vremenske i frekvencijske analize [12]. Prije početka analize, u programu DEEPSOIL moguća je i obrada (filtriranje) ulaznih seizmičkih pobuda. Također, DEEPSOIL programom osnovna stijena se može modelirati kao kruti ili elastični poluprostor.

Pošto je ulazni zapis potresa izmjeren na površini terena [11], izvedena je dekonvolucija seizmičke pobude. Dobivenu seizmičku pobudu nakon procesa dekonvolucije, program automatski zadaje na razini osnovne stijene. Osnovna stijena modelirana je kao kruti poluprostor.



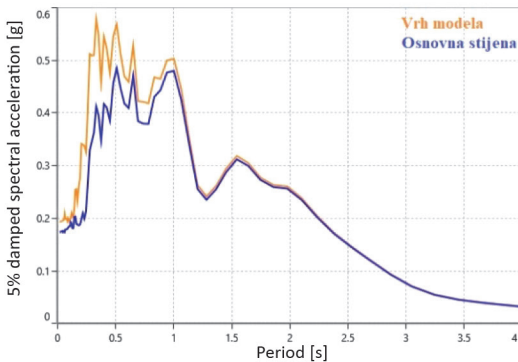
Slika 6. Prikaz 1-D modela tla s profilom brzina poprečnih valova

Korištene su empirijske krivulje $G/G_0 - \gamma$ i $D - \gamma$ iz literature. Za prvi sloj tla, krivulje omjera $G/G_0 - \gamma$ i $D - \gamma$ određene su prema Vučetiću i Dobryu [6] za glinu, u odnosu na indeks plastičnosti (15 %). Za ostala tri sloja, krivulje su određene prema Seedu i Idrisu [7] za pijesak. Korištenje tih krivulja za ostala tri sloja tla moglo bi do neke mjere opisati prigušivanje tih sloja, jer su tri donja slojeva tla mješavina sitnozrnih i krupozrnih tala.



Slika 7. Krivulje redukcije modula posmika i omjera prigušivanja: a) prvi sloj [6], b) ostala tri sloja tla [7]

Na slici 8. prikazani su elastični spektri odziva vrha modela (površine terena) i dna modela (osnovne stijene). Može se uočiti da se odzivi površine terena i osnovne stijene ne poklapaju. Stoga se može zaključiti da je seizmička pobuda amplificirana nakon putovanja s osnovne stijene do površine terena. Također, vidljivo je da amplifikacija pobude nije ista duž svih vremenskih koraka. Vrijednost vršnog spektralnog ubrzanja iz ulaznog zapisa potresa iznosi 0,580g (5,689 m/s²), a na razini osnovne stijene nakon dekonvolucije iznosi 0,485g (4,757 m/s²), što znači da je faktor amplifikacije vršnih spektralnih ubrzanja 1,196. Međutim, omjer amplifikacije nije isti za svaki period spektralnog odziva. Za period od 0,01 do 0,2 s, vrijednost omjera amplifikacije iznosi otprilike 1,10. Nakon perioda od 1 s, amplifikacija je gotovo zanemariva. Ta amplifikacija seizmičke pobude pripisuje se mekim slojevima tla iznad osnovne stijene. Vidi se da je spektar odziva površine terena malo pomaknut prema duljim periodima u odnosu na spektar odziva osnovne stijene.



Slika 8. Prikaz spektra odziva na vrhu i na dnu modela za 5 % prigušivanja

U tablici 2. prikazane su vrijednosti vršnih spektralnih ubrzanja na vrhu svakog sloja tla i omjeri amplifikacija u odnosu na osnovnu stijenu.

Tablica 2. Vrijednosti ubrzanja i omjeri amplifikacija svakog sloja

Dubina [m]	Vršno ubrzanje [g]	Omjer amplifikacije
0	0,580	1,196
2	0,565	1,165
4	0,560	1,154
8	0,548	1,130

7 Zaključak

U ovom radu provedena je numerička analiza amplifikacije seizmičke pobude za jedan tipičan geotehnički profil u gradu Tirani, koristeći zapis potresa iz potresa 26. studenoga 2019. u Albaniji. Analiza se temelji na ekvivalentnolinearnoj metodi, koja se pokazala jednostavna i praktična za preliminarnu procjenu amplifikacije seizmičke pobude, iako ta metoda ne uzima u obzir stvarno nelinearno ponašanje tla. Ekvivalentnolinearna metoda koristi linearna svojstva tla, za razliku od nelinearne metode koja često zahtijeva veći broj parametara tla (dulje vrijeme i veće troškove ispitivanja) koji opisuju nelinearno ponašanje tla u vremenu, što ju čine skupljom i nepraktičnom za preliminarne procjene amplifikacije seizmičkih pobuda. Pošto je ulazni zapis potresa izmjeren na površini terena [9], provedena je dekonvolucija seizmičke pobude.

Iz rezultata ovog istraživanja mogu se izvući sljedeći zaključci:

- Zbog razlike u impedanciji između osnovne stijene i površine terena, meki površinski sedimenti zarobljavaju seizmičku energiju i dolazi do pojave amplifikacije seizmičke pobude;

- Vrijednost omjera amplifikacije seizmičke pobude uglavnom je veća za početne vrijednosti perioda (slika 8). Spektar odziva površine terena je malo pomaknut prema duljim periodima u odnosu na osnovnu stijenu;
- Osim parametara tla, na amplifikaciju seizmičke pobude utječe i duljina putovanja seizmičkog vala od osnovne stijene do površine terena kroz tlo (tablica 2), što odgovara drugim dobivenim rezultatima iz literature [13]. Zbog toga za slučaj većih debljina slojeva tla iznad osnovne stijene, možemo očekivati i veće omjere amplifikacija seizmičkih pobuda;
- Prije planiranja izgradnje stambenih zgrada na mekim tlima (primjerice u gradu Tirani), potrebno je procijeniti veličinu amplifikacije uslijed potresnog djelovanja.

Literatura

- [1] M 6.4 - 15km WSW of Mamurras, Albania, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70006d0m/executive>
- [2] Aliaj, Sh.: Active Fault Zones in Albania. Abstrakt, General Assembly of European Seismological Commission, Lisbon, Portugal, September, 2000.
- [3] Koçiu, S., Sh. Aliaj, A. Pitarka, V. Peçi, N. Konomi, H. Dakoli, K. Prifti, A. Koçiu, J. Kero, V. Shehu, K. Goga, N. Goro, L. Kume, L. Kapllani, P. Papadhopulli, R. Eftimi, M. Kondo and N. Puka.: Microzonation of Tirana City, Technical report, Archive of Institute of Geosciences, (in Albanian), Tirana, 1988.
- [4] Konomi, N., H. Dakoli, K. Prifti, A. Koçiu, J. Kero, V. Shehu, K. Goga, N. Goro, L. Kume, L. Kapllani, P. Papadhopulli, R. Eftimi, M. Kondo and N. Puka.: Engineering geological zonation of Tirana City, Technical report, Archive of Faculty of Geology and Mine, (in Albanian), Tirana, 1988.
- [5] Bowles, J. E.: Foundation Analysis and Design. Illinois: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- [6] Vucetic, M. and Dobry, R.: Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, Journal of Geotechnical Engineering (1991), 117, 89-107.
- [7] Seed, H. Bolton, and I. M. Idriss.: Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. UCB/EERC-70/10, p. 48, December 1970.
- [8] Seville, E. and Metcalfe, J.: Developing Hazard Risk Assessment Framework for the New Zealand State Highway Network. Land Transport New Zealand (2005), Report no. 276. pp. 80.

- [9] Aki, K., Richards, P.G.: Quantitative Seismology. University Science Book, California, 2009.
- [10] Rezaeian, S., Bozorgnia, Y., Idriss, I. M., Abrahamson, N., Campbell, K., & Silva, W.: Damping Scaling Factors for Elastic Response Spectra for Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions: "Average" Horizontal Component, Earthquake Spectra (2014) 30(2), 939–963.
- [11] Durresi Main Shock, www.geo.edu.al
- [12] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Okan, I., Xing, G., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020) "DEEPSOIL 7.0, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [13] Duni, Ll., Bozo, L., Kuka, N., and Begu, E.: An Upgrade of the Microzonation Study of the Centre of Tirana City, International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (2010) 3.

FRP pješački mostovi – mogućnosti oblikovanja i optimizacije

Lucija Stepinac¹, doc. dr. sc. Ana Skender², izv. prof. dr. sc. Josip Galic³, izv. prof. dr. sc. Domagoj Damjanović⁴

¹Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, lstepinac@arhitekt.hr

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

³Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, jgalic@arhitekt.hr

⁴Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, domagoj.damjanovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Gradnja pješačkih mostova u FRP-u u novije vrijeme sve više dobiva na značenju zbog povoljnih karakteristika toga materijala i sustava. Kroz postojeće sustave na tržištu, načine njihovog spajanja i načine proizvodnje izdvojeno je 12 različitih tipova ploča. Provedena je FEM analiza na modelima različite geometrije ispune poprečnog presjeka te su uspoređeni rezultati. Analiza je provedena u programu Simscales, a modeliranje u Rhinocerosu u kombinaciji s Grasshopperom. Preliminarne analize su rađene u vidu odabira najpogodnijega sustava te će poslužiti za daljnja istraživanja u pogledu optimizacije materijala na mjestima manjih naprezanja ili povećanja i dodavanja elemenata na mjestima gdje je to potrebno.

Ključne riječi: FRP, pješački mostovi, geometrija, spojevi, proizvodnja, 3d ispis

FRP pedestrian bridges – design and optimisation possibilities

Abstract

Construction of FRP pedestrian bridges has recently become increasingly interesting due to favourable mechanical and visual characteristics of the material and possible structural systems. Twelve different types of slabs are analysed based on systems available on the market, their connections and manufacturing process. FEM analysis is performed on models of various cross-section geometries, and the results are compared. The analysis is performed using the Simscales software, and modelling is done by means of Rhinoceros and Grasshopper. Preliminary analysis provides indications for future system optimization by removing material in the location of lower stresses or by placing additional material or whole members where needed.

Key words: FRP, pedestrian bridges, geometry, connections, construction, 3d printing

1 Uvod

Prije gotovo 80 godina Henry Ford upoznao je svijet s novim materijalom kroz slogan "Deset puta jači od čelika" [1] i taj materijal još i dandanas smatramo nedovoljno istraženim, a naziva se FRP (Fiber Reinforced Polymers) ili vlaknima ojačani polimeri. FRP je dvokomponentni materijal koji se sastoji od 30 do 70 % vlakana, odnosno 50 % ukupne težine i ostatka što čini matrica. Vlakna smatramo glavnom komponentom koja je zaslužna za nosivost, krutost, čvrstoću i otpornost na temperaturu. Matrica obavija vlakna, štiti ih u proizvodnom procesu i za vrijeme uporabe, osigurava ravnomjernu raspodjelu opterećenja do pojedinih vlakana, ali također ima ulogu u osiguravanju trajnosti kompozita [2, 3].

Na tržištu postoji velik broj vrsta vlakana, a odabir i njihova primjena ovise o sugestiji investitora, arhitekta ili konstruktora (statičara) čiji bi odabir trebao biti optimalan u pogledu zahtijevanih karakteristika i ekonomičnosti. Najčešći tipovi anorganskih vlakana su staklena vlakna (GFRP), karbonska (CFRP), aramidna (AFRP) i bazaltna (BFRP). Neka od korištenih organskih vlakana su sisal, banana, kopriva, konoplja, lan itd.

Kompoziti imaju visok modul elastičnosti i nosivost, a malu gustoću što ih čini idealnim izborom za konstrukciju nosača ili hodne ploče mostova, ne samo za ojačanje postojećih konstrukcija nego i za primjenu u hibridnim ili čisto kompozitnim konstrukcijama mostova [4, 5]. Brza ugradnja, otpornost na koroziju, vodootpornost, izgled, postojana boja, nosivost, otpornost na umor, dobre seizmičke karakteristike i potencijal za gradnju većih raspona neke su od prednosti primjene FRP-a u mostovima [6].

Brza proizvodnja i jednostavna montaža FRP mostova neki su od razloga njegove sve češće primjene, a i dugoročno se očekuje smanjenje troškova održavanja u odnosu na tradicionalne materijale [7]. Jedna od prednosti FRP-a koja također ide u prilog održivosti jest i brza ugradnja, čime se manje utječe na društveno okruženje, a i jednostavniji je i lakši prijevoz jer je težina kompozitnih elemenata manja, pa i održiva. Uzevši sve to u obzir, emisija CO₂ je reducirana za 20 % u odnosu na betonske ploče. Novost na tržištu su prirodna vlakna i prirodne smole čiji cilj je postaviti ovaj materijal na višu razinu održivosti [8].

Problem s kojim se susreće svaki novi materijal je i pronalaženje optimalnog sastava, odnosno forme, pri čemu prolazi kroz različite faze kopiranja tradicionalnih materijala. Zato bi arhitekti i inženjeri trebali biti bolje upoznati s estetskim i mehaničkim karakteristikama koje taj materijal nosi te iskoristiti sve prednosti u svim aspektima građevinarstva [1]. Kada govorimo o pješačkim mostovima ili pločama, u prvom redu treba definirati optimalnu geometriju.

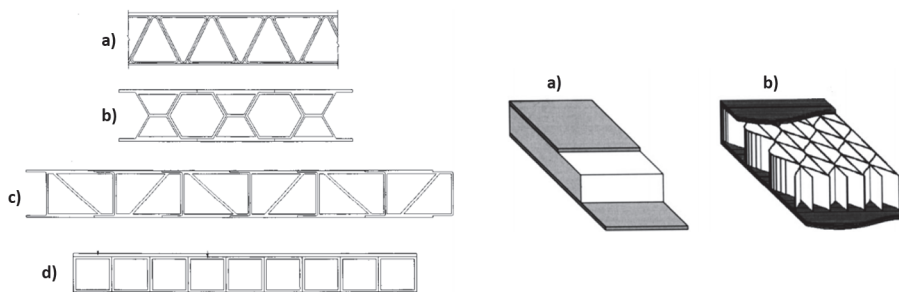
Cilj je ovog rada prikazati prednosti i nedostatke gradnje pješačkih mostova u FRP-u, dati osvrt na sadašnje stanje te prikazati mogućnosti oblikovanja ovakvih sustava.

Budući da su istraživanja tek u pripreмноj fazi, izrađena su preliminarna FEM modeliranja kako bi se dobio uvid te odredile smjernice za daljnja istraživanja.

1.1 Statički sustavi

Godine 1991. Plecnik i ostali su napravili analizu različitih plošnih sustava za ploče mostova [9]. Najučestaliji tipovi se nisu znatno promijenili do danas, sendvič-paneli i ekstrudirani profili i dalje su najčešći u proizvodnji FRP-a.

Za konstrukcijske svrhe, tehnologija ekstrudiranja je najpoznatija od svih proizvodnih procesa, pa su i najčešći sustavi ploča napravljeni upravo adhezivnim spajanjem ekstrudiranih profila (slika 1.): EZSpan (Atlantic Research); Superdeck (Creative Pultrusions); DuraSpan (Martin Marietta Materials); kvadratne cijevi (Strongwell). Ostali sustavi su sendvič: pjenasta ispunjena ili profilirana visokovalna ispunjena (KSCI) [10]. Sendvič-paneli s pjenastom ispunjenom se sastoje od vanjskih ploča koje preuzimaju opterećenje i pridonose fleksijskoj krutosti elementa, a pjenasta ispunjena male težine povezuje vanjske krute ploče i ima ulogu u raspodjeli opterećenja između njih. Otpornost na UV zračenje i vanjske vremenske utjecaje postiže se posebnim površinskim premazima.



Slika 1. Ploče nastale spajanjem vučenih komponenti (lijevo): a) EZSpan (Atlantic Research); b) Superdeck (Creative Pultrusions); c) DuraSpan (Martin Marietta Materials); d) kvadratne cijevi (Strongwell). Sendvič-paneli (desno): a) pjenasta ispunjena; b) profilirana visokovalna ispunjena (KSCI)

Opće je poznato da je zbog relativno malog modula elastičnosti granično stanje uporabivosti odnosno progibi, vrlo često mjerodavno za proračun i dimenzioniranje, a ako se veza između elemenata ostvaruje mehaničkim spajalima, onda ta mjesta postaju kritična, a ne nosivost elementa. Pločasti elementi izrađeni od vučenih profila, međusobno lijepljenih, konstante su visine, a ovisno o proizvodnji, ograničeni su na 80 do 225 mm. Maksimalan raspon takvih ploča je oko 2,7 m što znači da je potrebno i po nekoliko grednih nosača za oslanjanje. Kod ostalih sustava način je proizvodnje sendvič-elemenata u prilagođenom vakuumski potpomognutom po-

stupku prijenosa smole (VARTM – proces ručnog lameliranja). Takvi sustavi imaju nekoliko prednosti u odnosu na ekstrudirane: debljina ploče može varirati i može biti prilagođena rasponu ili nagibu ploče. Najveći dostignuti raspon iznosi oko 10 m. Tijekom proizvodnje moguća je ugradnja spojnih čeličnih pločica. Za površinski sloj ploča najčešće se koristi tanki sloj polimernog betona 6-20 mm. Uz navedene sustave ploča od vučenih profila ili sendvič-panela, također imamo i kabelske FRP hibridne mosne konstrukcije. Primjeri pločastih sustava navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Pločasti sustavi

Pločasti sustavi	Proizvodni proces	Debljina [mm]	Težina [kN/m ²]
Hardcore	VARTM	200 - 700	1,2 - 1,6
Superdeck	pultruzija i lijepljenje	203	1,1
DuraSpan	pultruzija i lijepljenje	130 i 190	0,8 i 0,9
EZSpan	pultruzija i lijepljenje	216	1,0
Strongwell	pultruzija i lijepljenje	170	-

Nosiva konstrukcija od FRP-a može biti izvedena kao plošna ravna ili trodimenzionalna odnosno zakrivljena forma. Savijanjem FRP sendvič-panela u trodimenzionalnu formu znatno se povećava krutost takvog elementa. Negativna činjenica za zakrivljenih formi je ta da se uslijed zakrivljenosti pojavljuje i moment savijanja koji zahtijeva dodatni materijal na uglovima. Primjer takvog mosta [1] razvijen je u suradnji s tvrtkom FiberCore. Kako se moment savijanja povećava prema sredini, tako se povećava i visina ploče. Posebnost ovakvih konstrukcija je dodatna krutost. Cilj svakog projektanta je zadovoljiti tražene uvjete nosivosti i uporabivosti uz najmanji utrošak materijala. Danas za iznalaženje optimalne forme imamo softvere kao što su Grasshopper, Karamba i Kangaroo [10].

1.2 Proizvodnja

Ovisno o željenoj formi ili zahtijevanim karakteristikama postoji više vrsta tehnologija za proizvodnju FRP elemenata za konstrukciju mosta. Jedan od prvih načina bilo je ručno laminiranje. Kao što samo ime kaže, uključuje ručni rad, a time i ograničen broj proizvedenih elemenata. Pozitivna činjenica je što ovisi o kalupu koji može biti neograničene forme, a to znači da je i orijentacija vlakana slobodna. Druga metoda je nanošenje prskanjem u kojem su pomiješana vlakna i matrica. Također je potreban kalup za izradu elemenata. Treći najpoznatiji proces je pultruzija. Tada se najprije potope vlakna u posudu u kojoj se nalazi matrica, a onda ta vlakna ulaze u zagrijani kalup gdje profil dobiva oblik. Profil se automatizirano izvlači iz kalupa i reže na zadanu dužinu. Metoda strojnog namatanja oko cijevi, vlakna u obliku rovinga prethodno namočena u matricu se namataju oko rotirajuće osovine, a konačni

proizvodi su uglavnom kružnog poprečnog presjeka. Međutim, orijentacija vlakana može biti višesmjerna, ovisno o mehanizmu i kutu namatanja, što može pridonijeti poboljšanju željenih karakteristika FRP elementa. Elementi proizvedeni pultruzijom pokazali su bolje karakteristike od onih u sendvič-panelu proizvedenih VARTM procesom ručnog laminiranja [10].

Kada je zahtjev trodimenzionalne geometrije za manji broj proizvoda, tada proizvodnja oplata postaje neekonomična, pa je sada područje interesa nekolicine istraživača i razvoj pametnih i fleksibilnih oplata. Postoje kalupi za betonske konstrukcije [11, 12] ili prilagodljive oplata za proizvodnju zakrivljenih staklenih panela [13] koji bi se mogli primijeniti i u proizvodnji FRP-a, a time omogućiti veću arhitektonsku slobodu.

Još jedna rastuća industrija je dobila svoju primjenu u gradnji pješačkih mostova - tehnologija 3d printanja. Primjer 3d printanog pješačkog mosta iz 2020. godine [14] ukupnih je dimenzija 15,5 x 3,8 m i projektiran je na opterećenje od 250 kg/m² i na očekivano trajanje 30 godina (slika 2.). Materijal koji je korišten je ASA (acrylonitrile styrene acrylate), a ojačan je staklenim vlaknima. Ukupna težina mosta iznosi 5,8 t, od čega udio vlakana iznosi 12,5 % u ukupnoj težini. Gradnja mosta je trajala 30 dana na 3d printeru čiji je kapacitet 8 kg/h, a volumen 24 x 4 x 1,5 m.



Slika 2. Prvi 3d printani most u Kini, Shanghai [14]

1.3 Spojevi

Dimenzije poprečnih presjeka ograničene su proizvodnim procesom, pa je potrebno spajati više njih kako bi se dobila zahtijevana dimenzija elementa. Prema Eurocomp normi i priručniku [15], postoje tri vrste spojeva: spojevi koji bi trebali opstati cijeli životni vijek konstrukcije i čiji bi kolaps značio opasnost za cijelu konstrukciju; spojevi čije otkazivanje utječe na lokalna oštećenja bez značajnijeg utjecaja na glavnu konstrukciju i ne-konstrukcijski spojevi koji uglavnom služe za spajanje sekundarne zaštitne konstrukcije.

Glavne spojeve možemo podijeliti u tri skupine [16]: komponenta-komponenta spoj (CLC), a služi za spajanje vučenih elemenata u FRP ploču, panel-panel spoj (PLC) služi za povezivanje više FRP ploča i spojevi za povezivanje više sustava (SLC), primjerice spajanje ploče na nosače.

Za međusobno spajanje panela ili za spajanje panela za nosače mogu se upotrebljavati ljepila, mehanička spajala ili njihove kombinacije, a glavni je zahtjev da budu

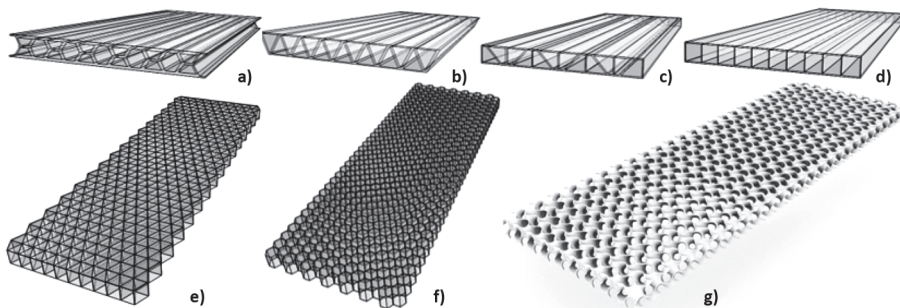
otporni na umor i na vanjske utjecaje. Dominantni spojevi u FRP-u su ljepila i mehanička spajala. Jednostavnost spajanja lijepljenjem još u proizvodnji, a time i ušteda novca i vremena, neki su od razloga zašto je češća primjena ljepila za spajanje komponenti unutar FRP ploče. Ljepila za spajanje su obično epoksidna i poliuretanska [17]. Mehanička spajala imaju prednost jer ih je lako demontirati i zamijeniti što nije slučaj s lijepljenim spojevima.

Kada se bira spoj između ploče i nosača, osnovno je znati treba li ili ne treba demontaža. Na osnovi toga izabrat će se mehanička spojna sredstva ili trajno spajanje pomoću adhezivnih spajala, a mogućnost je izvedbe i hibridnog spoja. Hibridni spoj ima nekoliko prednosti: povećanje globalne krutosti i nosivosti sustava [18] i povećanje duktilnosti konstrukcije [19].

Prema svemu navedenom, spojevi predstavljaju najveći izazov pri projektiranju FRP mostova te je nužno definirati norme za projektiranje spojeva u FRP-u, naročito mehaničkim spajalima.

2 Plan istraživanja

Istraživanje je bilo usmjereno na stanje o FRP pločama odnosno sustavima koje općenito možemo podijeliti u dvije skupine: ploče nastale spajanjem vučenih profila i sendvič-ploče. Prema geometriji, očito je da spajanje elemenata proizvedenih pultruzijom ima orijentaciju pojasnica u smjeru pružanja ploče, a sendvič-paneli imaju okomitu orijentaciju i smjer profilacije je skraćen.

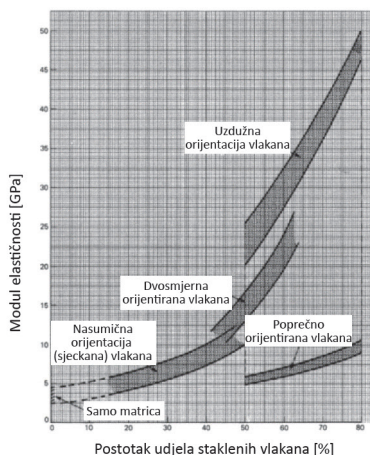


Slika 3. FRP ploče, primjer adhezivno spojenih vučenih profila: a) Superdeck; b) EZSpan; c) DuraSpan; d) Strongwell - Primjeri sendvič-panela s: e) trokutastom ispunom; f) sačastom ispunom i primjeri trodimenzionalne ispune: g) Gyroid

Pregledom ploča koje se nude na tržištu napravljeni su modeli za EZ-Span sustav (87,86 kg/m²), Superdeck (158,57 kg/m²), DuraSpan (11,43 kg/m²) i Strongwell (53,57 kg/m²) od vučenih profila i primjer izgleda sendvič-panela profilirana tro-

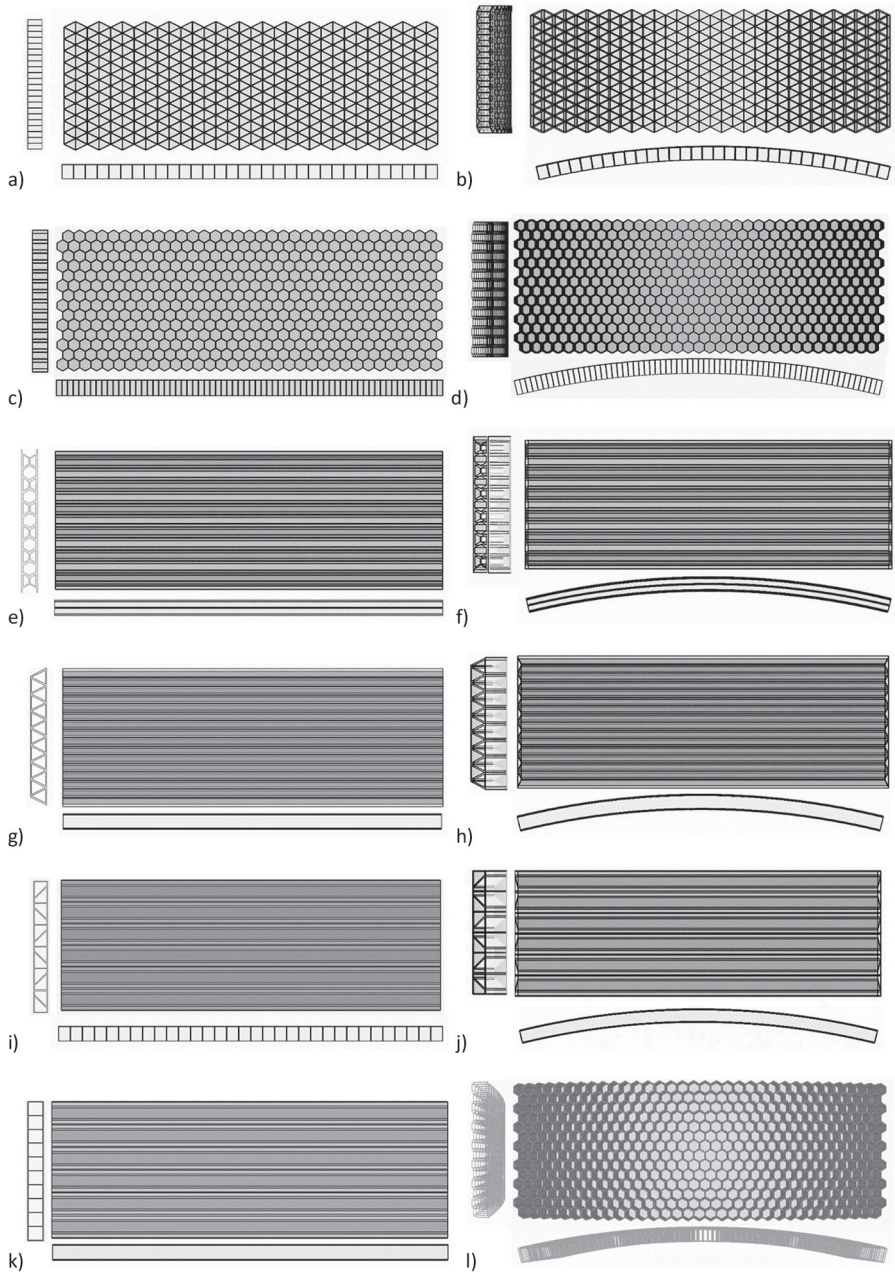
kutastom ispunom ($51,43 \text{ kg/m}^2$) i sačastom ispunom ($60,0 \text{ kg/m}^2$). Gyroid čija je struktura trodimenzionalna, zbog kompleksnosti mreže elemenata nije analiziran u ovoj fazi (slika 3.).

Odabir materijala uvelike ovisi o odabiru vrste vlakana, orijentaciji vlakana, vrsti matrice i postotku pojedine komponente u ukupnom kompozitu. Orijetacija vlakana je, između ostalog, definirana i proizvodnim procesom; usporedno s procesom pultruzije, pri čemu su vlakna orijentirana uzdužno, ili 3d printanja gdje smjer vlakana ovisi o definiranom smjeru printanja odnosno nanošenja slojeva. Za potrebu ovog istraživanja odabrano je ojačanje staklenim vlaknima zbog svoje pristupačnosti i ekonomičnosti. Modul elastičnosti može varirati od 5 GPa do 50 GPa (slika 4.) kod polimera ojačanih staklenim vlaknima [20]. Prema grafu sa slike 4. za udio staklenih vlakana 40 % pretpostavit će se modul elastičnosti kvaziizotropnog materijala u vrijednosti 10 GPa [20]. U daljnjem istraživanju detaljnije će se razmatrati karakteristike anizotropnog materijala te će se proračunski dobiti točna vrijednost za kvaziizotropan materijal.



Slika 4. Modul elastičnosti (kratkotrajni) za ojačanje staklenim vlaknima [20]

Standardne FRP ploče koje se nalaze na tržištu, proizvedene adhezivnim spajanjem komponenti proizvedenih pultruzijom ili sendvič-panela, bit će analizirane za pretpostavljeni modul elastičnosti i geometriju pješačkog mosta manjeg raspona $1,75 \times 5,0 \text{ m}$. Debljine ploča su 200 mm jer je to standardna dimenzija FRP ploča koje se nalaze na tržištu (slika 5.). Rubni uvjeti su definirani kao zglobovi na rubnim ploham ploče. Geometrija svih modela je riješena modeliranjem u programu Rhinoceros 6 uz pomoć alata Grasshoper. Sama FEM analiza je provedena u softveru SimScale, a kao mjerodavno za usporedbu uzet će se rezultati progiba pojedine ploče i prikazati i naprezanja. Opterećenje se uzima nefaktorizirano 5 kN/m^2 za uporabno i dodatno stalno 1 kN/m^2 .



Slika 5. Analizirani sustavi: a) Trokutasta "sendvič" ispuna; b) Trokutasta "sendvič" ispuna – u luku; c) Honeycomb; d) Honeycomb – u luku; e) Superdeck; f) Superdeck – u luku; g) EZSpan; h) EZSpan – u luku; i) DuraSpan; j) DuraSpan – u luku; k) Strongwell; l) Strongwell – u luku

Za svaku geometriju je provedena provjera o zakrivljenosti ploče, s visinom luka u sredini mosta 30 cm, a cilj je prikazati red veličine smanjenja pomaka za ploče u luku. Proizvodnja standardnih ploča nije predviđena za ploče u nagibu, iako u budućnosti s razvojem pametnih oplata ili pristupačnosti 3d printera većih dimenzija, to će biti realnost, što nam već pokazuju izvedeni primjeri u Kini [14].

Tablica 2. Rezultati progiba i napreznja različitih pločastih sustava dobiveni FEM analizom

Sustav	Progib [mm]	Napreznja [MPa]
Trokutasta "sendvič" ispunjena	4,90	8,60
Trokutasta "sendvič" ispunjena – u luku	3,56	5,50
Honeycomb	9,80	5,30
Honeycomb – u luku	2,38	4,45
Superdeck	3,68	3,25
Superdeck – u luku	0,78	1,43
EZSpan	7,03	5,41
EZSpan – u luku	1,46	2,56
DuraSpan	4,43	6,10
DuraSpan – u luku	1,09	2,53
Strongwell	3,30	8,65
Strongwell – u luku	1,37	3,55

4 Rasprava i zaključak

Tijekom povijesti uporaba naprednih tehnologija vrlo sporo ulazi u građevinski sektor, za razliku od primjerice avioindustrije, autoindustrije, medicine, itd. gdje se itekako iskorištava potencijal ovog materijala.

Mogućnosti modeliranja u Rhinocerosu i Grasshoperu gotovo su neograničene, a softveri za FEM analizu kao što su Simscale, Abaqusa i sl. omogućuju statičku ili dinamičku analizu geometrijski složenih modela na temelju kojih se mogu dimenzionirati elementi. Budućnost je arhitektonskog oblikovanja FRP mostova u primjeni softvera, ali i naprednih tehnologija kao što je 3D printanje. To omogućuje automatiziranu proizvodnju nestandardiziranih elemenata ili cijelih konstrukcija uz minimalan ručni rad kao što bi to bio primjer pločastog elementa sa slike 3.g) te široki spektar mogućih geometrijskih oblika.

Prema rezultatima iz tablice 1., za ravne ploče Superdeck i Strongwell dobivene su najmanje vrijednosti progiba od 3,68 mm i 3,30 mm, a za zakrivljene pločaste elemente najmanji progib je dobiven za Superdeck – u luku s 0,78 mm i za DuraSpan – u luku 1,09 mm. Također najmanja napreznja su se pokazala kod Superdeck

pločastog elementa kako za ravnu tako i za zakrivljenu ploču. Prema preliminarnim podacima dobivenim numeričkim modeliranjem zakrivljenjem se progib smanjio za 1,5 - 5 puta a naprezanja za 1,5 - 2,5 puta. Važno je naglasiti da se zasad na tržištu ne mogu nabaviti zakrivljene FRP ploče, iako bi se njihov proračun mogao dobiti relativno jednostavnim numeričkim modelima i proizvesti pomoću pametnih oplata ili 3D printanje.

FRP ploče koje se mogu naći na tržištu, a analizirane su u ovom radu, relativno su neistražene i dosta ograničene s obzirom na dimenziju koje proizvođači nude, a time i mogućnosti odabira od strane projektanta/investitora. Također pretpostavka je da su to pločasti elementi koji se oslanjaju na uzdužne i/ili poprečne nosače na određenom razmaku. Cilj je ovog rada bio prikazati nosivost takvih ploča ako samostalno nose na rasponu od pet metara te koliko se dodatno povećava nosivost i krutost zakrivljenjem oblika.

Daljnijim modeliranjem i testiranjem na stvarnim modelima dobit će se bolji uvid u mogućnosti oblikovanja pločastih elemenata za potrebe pješačkih mostova od polimernih materijala. Bez obzira na činjenicu da je prvi FRP most u svijetu izveden 1980., i dalje nam je gradnja u ovom materijalu velika nepoznanica. Manjak izvedenih objekata i manjak referentnih ispitivanja konstrukcija u tom materijalu, ujedno je i razlog zašto još uvijek nema definiranih normi za proračun poput primjerice što su Eurokodovi za beton, čelik ili drvo. Trajnost FRP-a je neupitna, ali visoke cijene su i dalje prepreka u odabiru upravo tog materijala za gradnju. Većina arhitekata i konstruktora najčešće primjenjuje poznate tradicionalne materijale koji su im dostupni i čiji im je proračun poznat, a samo nekolicina poznaje i proračun anizotropnog materijala kao što je FRP. Naposljetku, ali ne manje važno, treba spomenuti izvedbu spojeva. Za standardnu primjenu mehaničkih spajala ne vrijede ista pravila kao kod čelika i drva, a primjena adhezivnih spajala i dalje je nedovoljno ispitana [3]. Istraživači su optimistični u pogledu korištenja FRP-a i za veće raspone mostova, uz nužnost određivanja normi za projektiranje i upoznavanje struke s prednostima koje taj materijal nudi.

Daljnje istraživanje na temu FRP pješačkih mostova odnosit će se na konkretnije definiranje karakteristika materijala, iznalaženje novih trodimenzionalnih formi s nosačem ili bez njega te izvedba i testiranje modela u stvarnim dimenzijama.

Literatura

- [1] Smits, J.: Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges. *Engineering* (2016) 2, pp. 518–27.

- [2] Tuakta, C.: Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures. Thesis (M. Eng.). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2005.
- [3] Sonnenschein, R., Gajdosova, K., Holly, I.: FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges. *Procedia Engineering* (2016) 161, pp. 477–82.
- [4] Curran, P.: Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. *Bridge Engineering* (2005) 158:39–39.
- [5] Office of the European Union. Prospect for New Guidance in the Design of FRP. Report (2016).
- [6] Jin, F., Feng, P., Ye, L.: Study on dynamic characteristics of light-weight FRP footbridge, 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering CICE Beijing, p. 173–6, 2010.
- [7] Canning, L., Luke, S.: Development of FRP bridges in the UK - An overview, *Advanced Structural Engineering* (2010); 13:823–35
- [8] Nazim, A., Ansari, M.: A Review on Natural Fibre Polymer Composites, *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology* (2017), 6, pp. 81–6.
- [9] Gürtler, H., W.: Composite Action of Frp Bridge Decks Adhesively Bonded To Steel Main Girders, Thesis Lausanne, EPFL, 2004.
- [10] Smits, J.: The Art of Bridge Design. PhD Thesis. Delft University of Technology, 2019.
- [11] Schipper, R., Janssen, B.: Curving Concrete – A Method for Manufacturing Double Curved Precast Concrete Panels using a Flexible Mould. *Journal of the IAAC* (2011).
- [12] Schipper, R., Janssen, B.: Deliberate deformation of concrete after casting, 2nd International Conference on Flexible Formwork, University of Bath, 132–9, 2012.
- [13] Rietbergen, D; Vollers, K., J.: A method and apparatus for forming a double-curved panel from a flat panel. European Patent Office EP2167435A1, 2007.
- [14] IAAC. 3D printed bridge. iaac 2020. <https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/>.
- [15] Clarke, J.L; European Structural Polymeric Composites Group: Structural Design of Polymer Composites: EUROCOMP, 1996.
- [16] Zhou, A., Keller, T.: Joining techniques for fiber reinforced polymer composite bridge deck systems, *Composite Structures* (2005) 69, pp. 336–45.
- [17] Uddin, N.: Developments in fiber-reinforced polymer (FRP) composites for civil engineering. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2013.

- [18] Keller, T., Gürtler, H.: Design of hybrid bridge girders with adhesively bonded and compositely acting FRP deck. *Composite Structures* (2006) 74, pp. 202–12.
- [19] Keller, T., De Castro, J.: System ductility and redundancy of FRP beam structures with ductile adhesive joints. *Composites Part B: Engineering* (2005) 36, pp. 586–96.
- [20] Leggatt, A.: *Grp and Buildings: a Design Guide for Architects and Engineers*. Elsevier Ltd, 1984.

Morfodinamika i održivost nasipane šljunčane plaže – primjer plaže Ploče u Rijeci

Filip Kalinić¹, prof. dr. sc. Goran Lončar²

¹Tehničko veleučilište u Zagrebu, fkalinic@tvz.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, goran.loncar@grad.unizg.hr

Sažetak

Tijekom nekoliko ekstremnih valnih situacija u prosincu 2019. i siječnju 2020. godine došlo je do erozije velike količine nasipanog šljunčanog materijala plaže Ploče u Rijeci. Za potrebe analize morfodinamike nasipnog materijala plaže Ploče u uzdužnom smjeru (longshore transport) primijenjen je numerički model koji sadrži dva spregnuta modula. Prvi tretira valne deformacije u akvatoriju plaže, a drugi morfodinamiku u uzdužnom profilu plaže. Za rubne uvjete modela valnih deformacija korišteni su podaci o valovima s polusatnom rezolucijom iz valografske postaje smještene u neposrednoj blizini plaže.

Ključne riječi: numerički model, pronos šljunka, plaža Ploče, grad Rijeka

Morphodynamics and sustainability of the artificial gravel beach - the example of Ploče beach in Rijeka

Abstract

A large amount of gravel material eroded from Ploče Beach in Rijeka during several extreme wave situations in December 2019 and January 2020. The analysis of morphodynamics of gravel material from Ploče Beach in longitudinal direction (longshore transport) was performed by numerical model containing two coupled modules. The first is related to wave deformations in the water area of the beach, and the second one concerns morphodynamics in the longshore profile of the beach. Half-hour wave data from a wave motion sensor located near the beach was used for boundary conditions of the wave deformation model.

Key words: numerical model, gravel transport, Ploče beach, City of Rijeka

1 Uvod

Kako bi se postigla željena kvaliteta rekreacijske usluge na plažama, često se prirodna obalna linija dodatno nasipava šljunčanim materijalom. S obzirom na visoku cijenu dohrane plaže sa šljunčanim materijalom, potrebno je racionalno odabrati samu poziciju nasipavanja i odgovarajući nasipni materijal. Djelovanje valova uzrokuje morfološku aktivnost u obliku erozije i sedimentacije (akumulacije) nasipnog materijala. Pronos nasipnog materijala (morfodinamika) se odvija u poprečnom i uzdužnom smjeru, pri čemu su najintenzivnije poprečne promjene u zoni svoša vala [1]. Erodirani materijal se odnosi u veće dubine, gdje se trajno zadržava (akumulacija) ili nastavlja svoje potpovršinsko kretanje u uzdužnom smjeru plaže [2]. Kod umjetnih (nasipanih) šljunčanih plaža moguć je izostanak daljnjih valnih situacija u kojima se pridneno istaloženi (akumulirani) nasipni materijal ponovno izvlači na lice plaže [3]. Valne situacije koje uzrokuju regeneraciju materijala uobičajeno su vezane uz dulje valne periode i manje valne visine, a što izostaje u slučaju poluzatvorenog akvatorija riječkog zaljeva. Inicijalni nagib lica plaže i izabrane fizikalne karakteristike nasipnog plažnog materijala primarno određuju morfodinamičku senzibilnost pojedine plaže [4]. Tako je morfodinamika plaže od kompozitnog materijala (npr. pijeska i šljunka) različita od morfodinamike plaža od čistog šljunka [6]. Također je potrebno napomenuti da univerzalna kvantifikacija pronosa sedimenta šljunka na načelima temeljne fizike do danas još uvijek nije dana [5]. Važan napredak ostvaren je prepoznavanjem i uspješnim opisom infiltracijsko-eksfiltracijskog procesa procjeđivanja u tijelu šljunčane plaže [6]. Recentni programi monitoringa morfodinamičkih karakteristika šljunčanih plaža uobičajeno se oslanjaju na primjenu optičkih i akustičkih mjerenja. Time se prate kratkoročne [7] i dugoročne [8] promjene profila plaža. Do sada su izvedeni i empirijski modeli ravnotežnog poprečnog profila pješćane ili šljunčane plaže [9]. Međutim, usporedba rezultata primjene empirijskih obrazaca i izmjerenih prirodnih profila šljunčanih plaža pokazala je da primjena empirijskih obrazaca ima uporište samo u slučaju homogenih okolišnih uvjeta [10]. Za analizu morfodinamike plaže s mješovitim ili pretežito šljunčanim materijalom razvijen je relativno mali broj numeričkih modela [11, 12, 13].

U ovom radu prezentirani su rezultati provedbe numeričkih simulacija za morfodinamiku šljunčane plaže Ploče (Rijeka) pri djelovanju gravitacijskih vjetrovnih valova. Implementacija numeričkog modeliranja ostvarena je kroz dva koraka. U prvom je uspostavljen numerički model valnih deformacija za akvatorij uokolo plaže, te su njime izračunana polja značajnih valnih visina H_s , vršnih valnih perioda T_p i incidentnog smjera valovanja za ekstremnu situaciju valovanja u razdoblju 20. do 22. prosinca 2019. Na otvorenim granicama prostorne domene numeričkog modela (rubni uvjeti) primijenjeno je forsiranje s izmjerenim vrijednostima H_s i T_p na obližnjoj valografskoj postaji. U drugom koraku primijenjen je numerički model morfodinamike u

uzdužnom smjeru šljunčane plaže s ciljem prepoznavanja zona erozije i akumulacije nasipnog materijala plaže.

Detaljna geodetska snimka terena obavljena je 16. siječnja 2020. U tom danu zamijećene su izraženije zone lokalne erozije/akumulacije materijala uzduž plaže. Dana 1. veljače 2020. izvedena je dohrana plaže sa 50 m^3 šljunčanog materijala frakcije $d_{50} = 20 \text{ mm}$, a nakon toga (7. veljače 2020.) ponovljena je i detaljna geodetska snimka terena. Budući da autori nisu na raspolaganju imali detaljnu snimku terena neposredno prije nastupa ekstremne epizode valovanja (20. do 22. prosinca 2019.), pretpostavili smo da detaljna snimka plaže od 7. veljače 2020., nakon dohrane plaže 1. veljače 2020., približno opisuje i stanje koje je prethodilo pojavi ekstremnog valovanja. Stoga je geodetska snimka napravljena 7. veljače 2020. usvojena za opis početnog stanja, a geodetska snimka od 16. siječnja 2020. pretpostavljena za opis konačnog stanja nakon ekstremne situacije valovanja.

U poglavlju 2 dan je uvid u korištene podloge pomoću kojih je omogućena provedba numeričkih simulacija te su dane najosnovnije informacije o početnim/rubnim uvjetima i odgovarajućoj parametrizaciji primijenjenog numeričkog modela. Rezultati provedbe numeričkih simulacija prikazani su u poglavlju 3, a u četvrtom poglavlju navode se zaključni komentari.

2 Materijali i metode

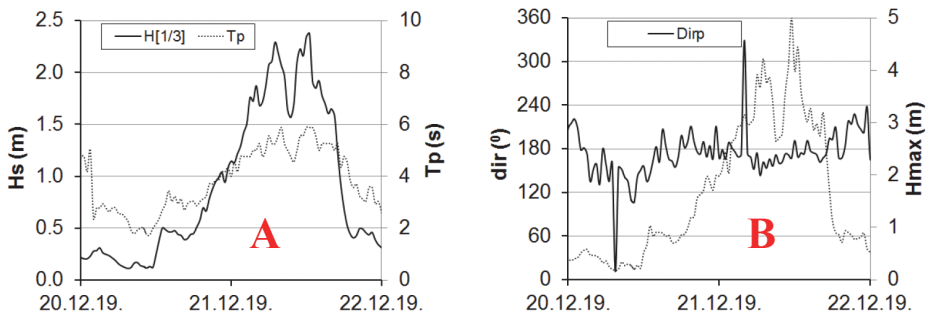
2.1 Raspoložive podloge

Plaža Ploče nalazi se u središnjem dijelu obalne linije grada Rijeke (slika 1.a). Plaža je srednjim perom izvedenim kao školjera podijeljena na "zapadni" i "istočni" dio. Ukupna duljina kupališnog dijela plaže je 210 m, pri čemu je zapadna plaža duga 120 m, a istočna 90 m. Širina nadmorskog dijela plaže varira između 8 i 15 m.

Za mjerenje valova na poziciji V1 ($\varphi = 45^{\circ} 19,588' \text{ N}$; $\lambda = 14^{\circ} 23,738' \text{ E}$, WGS 84, slika 1B) korišten je valograf tvrtke Datawell koji se sastoji od plutače (tipa MKIII) s ugrađenim GPS prijemnikom i digitalnim uređajem za registriranje podataka. Valografski bilježeni podaci sadržavaju standardne valne statistike za periode od 30 minuta (slika 2.). U promatranoj situaciji izmjereni maksimum značajne valne visine iznosio je $H_s = 2,37 \text{ m}$ (21. prosinca 2019. 12:30), s pripadnom maksimalnom visinom vala $H_{MAX} = 4,44 \text{ m}$, pripadnim vršnim spektralnim periodom $T_p = 5,88 \text{ s}$, pri incidentnom smjeru valovanja $Dir = 168.8^{\circ}$. Treba napomenuti da je maksimalna valna visina iz cijele situacije registrirana nešto ranije, istog dana u 11:30, te je iznosila $H_{MAX} = 5,0 \text{ m}$.

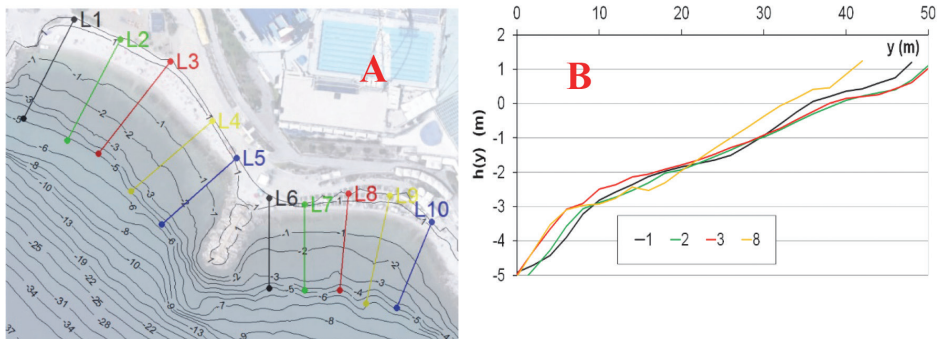


Slika 1. a) Pregledna karta šireg područja s naznakom lokacije provedenog istraživanja; b) Pozicija valografske postaje V1; c) Prikaz plaže prije pojave ekstremnih epizoda valovanja



Slika 2. Vremenske serije H_s (A) i T_p (A), te Dir_p (B) i H_{MAX} (B) u polusatnoj rezoluciji za razdoblje ekstremne situacije 20. do 22. prosinca 2019. (registrirano na valografskoj postaji V1)

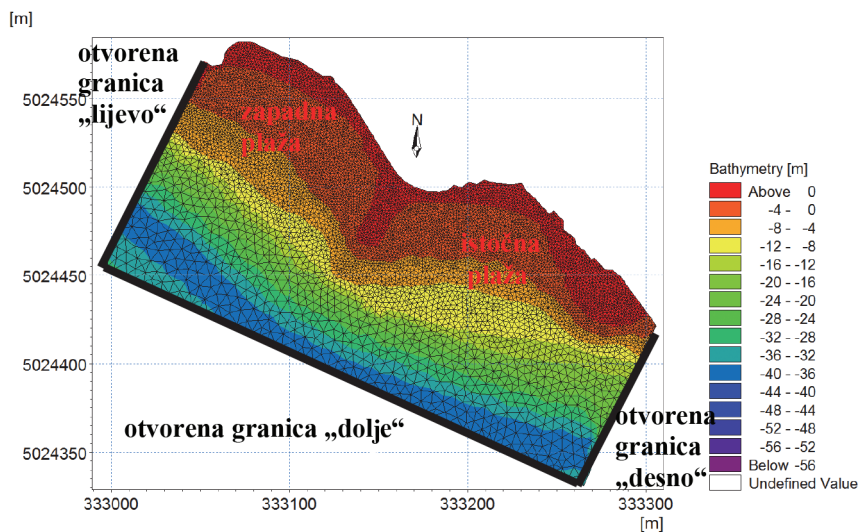
Prva geodetska situacija izmjerena je 16. siječnja 2020. (slika 3.). Laboratorijskim ispitivanjem granulometrijskog sastava plažnog materijala dobiven je $d_{50} = 20$ mm (promjer zrna 50 % učešća iz granulometrijske krivulje ispitnog uzorka)



Slika 3. a) Izmjerena geodetska situacija 16. siječnja 2020.; b) Izmjereni poprečni profili plaže 1, 2, 3 i 8

2.2 Model valnih deformacija

Prostorna domena numeričkog modela valnih deformacija i primijenjena modelska diskretizacija s konačnim volumenima prikazane su na slici 4.



Slika 4. Prostorna domena numeričkog modela valnih deformacija i diskretizacija modelske prostorne domene s nestrukturiranom mrežom konačnih volumenima na batimetrijskoj podlozi

Udaljenost između numeričkih čvorova, smještenih u težište površine svakog konačnog volumena, varijabilna je i proteže se od 9 m u dubokovodnom području do 0,5 m u zoni same obalne crte. Provedbom numeričkih simulacija za situacije 1 i 2 dobivaju se polusatno usrednjena polja značajnih valnih visina H_s , vršnih perioda T_p i incidentnih smjerova valne propagacije. Izmjerene vremenske serije značajnih valnih visina H_s , vršnih valnih perioda T_p i pripadnih incidentnih smjerova valne propagacije na valografskoj postaji V1 s polusatnom rezolucijom podataka upotrijebljene su za modelsko forsiranje na otvorenim granicama numeričkog modela valnih deformacija (rubni uvjeti). Početni uvjeti su definirani nultim valnim spektrom (odsutnost inicijalnog valnog gibanja). Hod morskih razina uzet je u obzir putem sedam osnovnih konstituenata plimnog signala za analizirani akvatorij [14].

Numeričke simulacije valnih deformacija provedene su sa spektralnim numeričkim modelom Mike 21sw (www.dhigroup.com). Diskretizacija spektralne frekvencijske domene provedena je kroz logaritamsku skalu, uz usvajanje minimalne frekvencije 0,1 Hz (valni period 10 s) i maksimalne frekvencije 1,75 Hz (valni period 0,57 s). Korišteno je 30 diskretnih koraka. Model proračunskim procedurama obuhvaća procese međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije, difrakcije, oplićavanja i loma valova u području malih dubina, te utjecaja pridnenog trenja.

2.3 Model uzdužnog transporta (long shore transport model)

Model morfodinamike proračunava promjenu pozicije obalne linije s obzirom na usvojenu referentnu liniju. Model je baziran na “teoriji jedne linije”, u kojoj jednažba kontinuiteta za volumen šljunčanog sedimenta plaže glasi:

$$\frac{\partial y_c}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{q_{sou}}{h_{act} \Delta x} \quad (1)$$

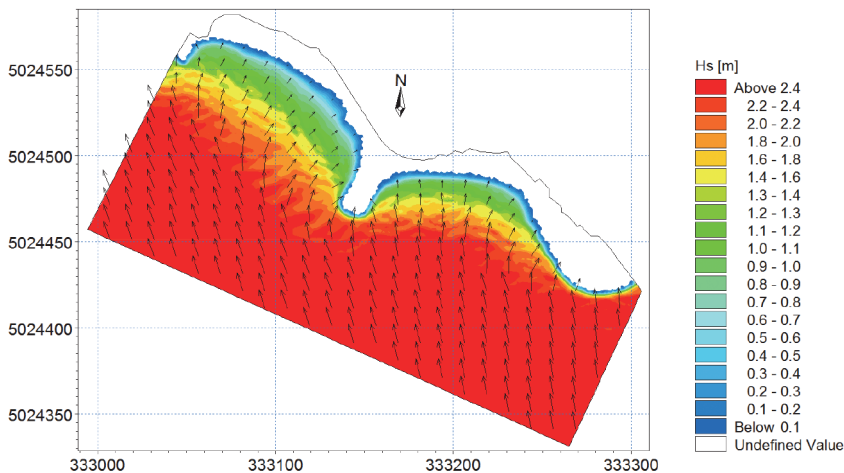
gdje je: y_c pozicija obale u poprečnom smjeru, t vrijeme, Q intenzitet dužobalnog transporta, x pozicija obale u uzdužnom smjeru, Q_{sou} član izvora sedimenta, h_{act} aktivna visina poprečnog profila.

S obzirom na to da središnje pero (slika 1C) predstavlja granicu koja fizički razgraničuje “zapadnu” i “istočnu” plažu, one se mogu promatrati kao dvije odvojene cjeeline. Jednažba 1 rješava se u sklopu softvera okruženja Mike/LPFM (<http://www.dhigroup.com>). Udio inercijalnih sila i utjecaj nagiba plaže interpretirano je prema radu Engelunda i Fredsøea [15]. Za opis nestacionarnih pridnenih naprezanja korištena je formulacija valnog turbulentnog graničnog sloja [16], a orbitalne brzine vala izračunane su prema metodologiji predočenoj u radovima Doeringa i Bowena [17]. Produkcija turbulentne kinetičke energije pri lomu neregularnih valova izračunana je na temelju primjene modela turbulencije od autora Battjesa i Janssena

[18]. Važna komponenta uspostave morfodinamičkog modela je izbor vrijednosti konstanti (parametrizacija modela). U okviru provedenih simulacija usvojene su sljedeće vrijednosti: poroznost 0.4, dinamički koeficijent trenja 0.7, statički koeficijent trenja 1.4, bezdimenziojski koeficijent α 4.6, koeficijent povlačenja 1.4, hidrodinamički koeficijent mase 0.5. Rješavanje sustava jednačbi provodi se implicitnom Crank-Nicholsonovom shemom. Rubni uvjeti ovog modela (H_s , T_p i α) dobivaju se ekstrakcijom rezultata u početnim točkama poprečnih profila 1-10 na dubini 5m (slika 3).

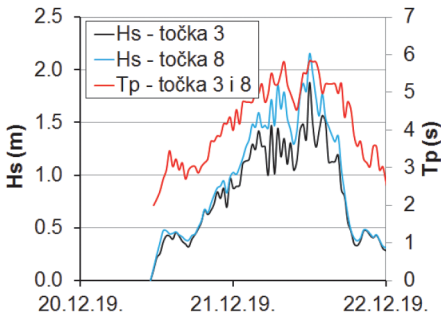
3 Rezultati numeričkih simulacija

Slika 5 prikazuje modelsko polje H_s u terminu registriranja maksimalne vrijednosti H_s tijekom ekstremne situacije (21. prosinca 2019 12:30). Prikazano polje upozorava na difrakciju oko središnjeg pera i refrakciju valova ispred lica zapadne plaže. Zbog refrakcije dolazi do povećanja kuta β između smjera propagacije valova i obalne linije u zoni poprečnih profila 1 - 5 ($\beta \approx 0^\circ \rightarrow \beta \approx 45^\circ$). Treba napomenuti da u uvjetima $\beta = 0^\circ$ nema uzdužnog ni poprečnog pronosa sedimenta, pri $\beta = 45^\circ$ uzdužni (longshore) pronos sedimenta je maksimalan, a u slučaju $\beta = 90^\circ$ pronos sedimenta se odvija samo u poprečnom smjeru. Valno polje ispred istočne plaže ima malo drugačija obilježja. Difrakcija oko desnog pera nema izraženi utjecaj, a refrakcija djeluje na način da se povećava kut β od početnog $\approx 45^\circ$ do krajnjeg $\approx 90^\circ$. U ovakvim uvjetima valovanja očekuje se smanjenje pronosa šljunka u uzdužnom smjeru i povećanje pronosa u poprečnom smjeru.



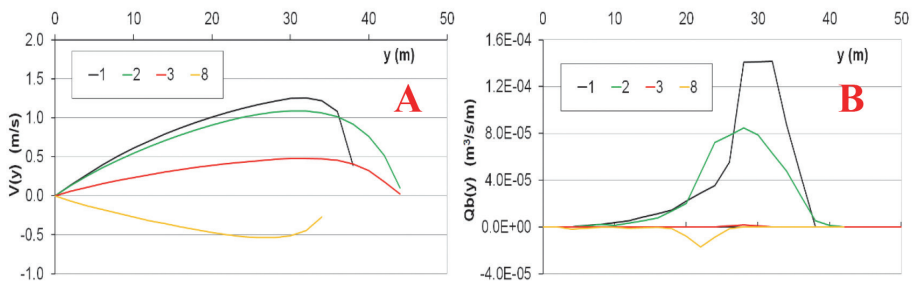
Slika 5. Polja značajnih valnih visina H_s u terminu registriranja maksimalnog H_s na valografu V1 (21. prosinca 2019. 12:30)

Rezultati numeričkog modela valnih deformacija (H_s , T_p i α - srednji smjer valne propagacije) u točkama na početku poprečnih profila 3 i 8 (slika 3) prikazani su na slici 6. (nestacionarni rubni uvjeti modela morfoloških promjena).



Slika 6. Vremenske serije H_s i T_p u razdoblju analizirane situacije za početne točke profila 3 i 8 sa slike 3

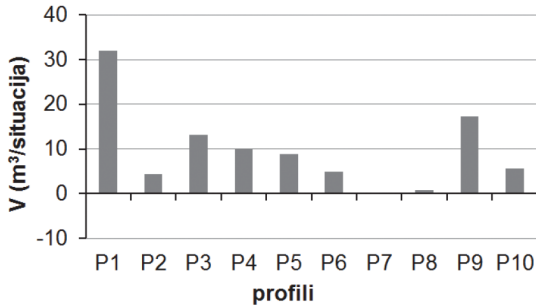
Na slici 7. prikazani su profili brzine uzdužnog (dužobalnog) strujanja generiranog valovanjem i intenziteta uzdužnog (dužobalnog) pronosa šljunka u poprečnim profilima 1, 2, 3 i 8 za termin pojave maksimalne značajne valne visine (21. prosinca 2019. 12:30) u analiziranoj ekstremnoj situaciji.



Slika 7. Raspodjela brzine uzdužnog strujanja v (A) i intenziteta uzdužnog pronosa šljunka Q_b (B) u profilima 1, 2, 3 i 8 za termin pojave maksimalne značajne valne visine (21.12.2019. 12:30) u analiziranoj ekstremnoj situaciji

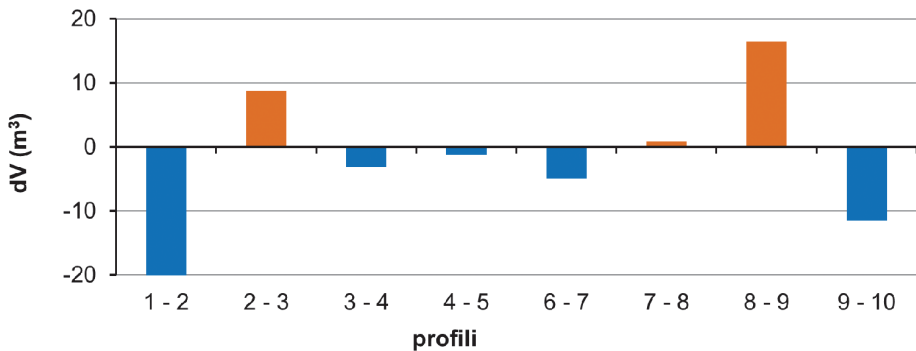
Ako se dužobalni protok nasipnog materijala Q_b plaže integrira po cijeloj duljini profila 1-10, te za cijelo simulacijsko razdoblje (20. prosinca 2019. 11:00 – 22. prosinca 2019. 11:00), dobivaju se ukupni volumeni materijala plaže koji su protekli kroz pojedini profil (slika 8). Pozitivni predznak ima smisao pronosa materijala u smjeru E→W i obratno. Sa slike 8. se može uočiti da je kroz profile 7 i 8 tok sedimenta minimalan, primarno kao posljedica ortogonalnog nailaska valova u odnosu na konturu

izobata i linije obale (minimalni uzdužni pronos sedimenta). Ovi rezultati upućuju na pojavu erozije s rubnih dijelova "istočne" plaže prema središnjem dijelu, u kojem se pojavljuje akumulacija materijala.



Slika 8. Volumeni materijala plaže koji su protekli kroz pojedini profil tijekom simulacijskog razdoblja (20. prosinca 2019. 11:00 – 22. prosinca 2019. 11:00)

S obzirom na rezultate dužobalnog pronosa ukupne količine sedimenta kroz usvojene profile 1-10, također je moguće odrediti i dijelove plaže u kojima se pojavljuje erozija i akumulacija. Razlika u intenzitetu ukupnog uzdužnog pronosa između dva susjedna profila rezultira erozijom (veći pronos kroz izlazni nego kroz ulazni profil) ili akumulacijom (veći pronos na ulaznom profilu nego pronos na izlaznom profilu). Na slici 9. prikazani su ukupni volumeni erozije/akumulacije uzduž plaže, između korištenih profila 1 – 10.



Slika 9. Ukupni volumeni erozije/akumulacije uzduž plaže između korištenih profila 1 – 10

Sa slike 9. se može uočiti da je u istočnom dijelu zapadne plaže (profili 3 – 5) prevladavala erozija koja rezultira prebacivanjem materijala prema središnjem dijelu zapadne plaže (profili 2 – 3). Najizraženija erozija događa se između profila 1 i 2,

a akumulacija materijala registrirana je između profila 2 i 3. Proračun ukupne bilance sedimenta za zapadnu plažu pokazuje da ukupna erozija premašuje ukupnu akumulaciju za $23,7 \text{ m}^3$, odnosno da je destruktivni učinak analizirane ekstremne situacije kvantificiran gubitkom materijala od $23,7 \text{ m}^3$. S druge strane, ukupna bilanca sedimenta za istočnu plažu upućuje na minornu akumulaciju materijala od $0,7 \text{ m}^3$, odnosno da su morfološke promjene izražene samo prebacivanjem materijala s rubnih dijelova istočne plaže prema središnjem dijelu.

4 Zaključak

Morfodinamika nasutog materijala na plaži Ploče u Rijeci modelirana je implementacijom dvaju numeričkih modela. Prvi je numerički model valnih deformacija u kojem se na temelju podataka s valografa u blizini plaže izračunavaju značajne valne visine, periodi i smjerovi nailaska valova na samoj plaži (udaljenost 5 m). Drugi numerički model predstavlja model morfodinamike kojim se izračunava promjena pozicije obalne linije s obzirom na usvojenu referentnu liniju. Treba naglasiti kako model morfodinamike uzima u obzir samo dužobalni transport materijala. Rezultati modela valnih deformacija predstavljaju rubne uvjete za model morfodinamike za promatranu situaciju. Rezultati provedenih proračuna upućuju na izraženu eroziju na rubnim dijelovima zapadne plaže, a akumulacija materijala uočena je između profila 2-3. Ukupna promjena volumena materijala za zapadnu plažu pokazuje neuravnoteženost odnosa erozije i akumulacije budući da erozija znatno premašuje akumulaciju. Na istočnoj plaži također dolazi do erozije uz srednje i desno pero, ali je ona manje izražena. Akumulacija materijala na središnjem dijelu istočne plaže odgovara eroziji na rubnim dijelovima te je sumarna količina promjene volumena približno ista.

Ovaj proračun predstavlja prvi korak u istraživanju elemenata mehanizma pronosa nanosa na umjetno nasutim plažama. U budućnosti je planirana instalacija "smart pebbles" oblutaka na plažu čijim bi se monitoringom bilježili pomaci oblutaka te se na taj način jasno definirao trend pomicanja plažnog materijala. Nastavak istraživanja temeljit će se na razvijanju numeričkih modela koji će biti verificirani geodetskim snimkama u kojima će se, usporedbom oblaka točaka, moći odrediti promjena volumena između sukcesivno snimljenih situacija. Kao rezultat cjelokupnog istraživanja autori će odrediti matematičku formulaciju kojom će prikazati ovisnost promjene volumena sedimenta o glavnim parametrima valovanja na plažama.

Literatura

- [1] Almeida, L., Masselink, G., Russell, P., Davidson, M., Poate, T., McCall, R., Blenkinsopp, C. & Turner, I.: Observations of the swash zone on a gravel beach during a storm using a laser-scanner, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, Proceedings 12th International Coastal Symposium, Plymouth, pp. 636–641, 2013.
- [2] Masselink, G., Russell, P., Blenkinsopp, C., Turner, I.: Swash zone sediment transport, step dynamics and morphological response on a gravel beach, *Marine Geology* 274 (2010), pp. 50–68.
- [3] Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Masselink, G.: Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K., *Marine Geology* 278 (2010), pp. 77–99.
- [4] Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Chadwick, A.J., Silva, R.: A numerical–empirical approach for evaluating morphodynamic processes on gravel and mixed sand–gravel beaches, *Marine Geology* 241 (2010), pp. 1–18.
- [5] Van Rijn, L.C. (1993.): *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, Aqua Publications, The Netherlands, 1993.
- [6] Buscombe, D., Masselink, G.: Concepts in gravel beach dynamics, *Earth Sci. Rev.* 79 (1–2) (2006), pp. 33–52.
- [7] Ojeda, E. & Guillen, J.: Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches, *Mar. Geol* 253 (2008) 1-2, pp. 51–62.
- [8] Forbes, D.L., Orford, J.D., Carter, R.W.G., Shaw, J. & Jennings, S.C.: Morphodynamic evolution, self-organisation and instability of coarse clastic barriers on paraglacial coasts, *Mar. Geol* 126 (1995) 1-4, pp. 63–85.
- [9] USACE: *Coastal Engineering manual*, Part III, EM 1110-2-1100, 2008.
- [10] Cope, S.: Predicting overwashing and breaching of coarse - clastic barrier beaches and spits — application to Medmerry, West Sussex, Southern England, *Proc. 5th International Coastal Dynamics Conference*, Barcelona, pp 1-14, 2005.
- [11] Williams, J., de Alegría-Arzaburu, A.R., McCall, R.T. & van Dongeren, A.: Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: laboratory and field results, *Coast. Eng.* 63 (2012), pp. 62–80.
- [12] Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Otta, A.K., Chadwick, A.J. (2006.): On the cross-shore profile change of gravel beaches, *Coastal Engineering* 53(4) (2006), pp. 335–347.
- [13] Lončar, G.; Bekić, D.; Carević, D.; Mostečak, H.; Babić, M.; Grbić, N. & Pranjić, V.: Numeričko modeliranje morfodinamike poprečnog profila na šljunčanom žalu Medveja”, *Hrvatske vode* 24 (2016) 95, pp. 29-38.

- [14] Janeković, I., Kuzmić, M.: Numerical simulation of the Adriatic Sea principal tidal constituents, *Ann. Geophys.* 23 (2005), pp. 3207–3218.
- [15] Engelund, F. and Fredsoe, J.: A sediment transport model for straight alluvial channels, *Nordic Hydrology* 7 (1976), pp. 296-306
- [16] Fredsoe, J.: The turbulent boundary layer in combined wave-current motion, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (HY8) (1984), pp. 1103-1120
- [17] Doering, J.C.; Bowen, A.J.: Parametrisation of orbital velocity asymmetry of shoaling and breaking waves using bispectral analyses, *Coastal engineering* 26 (1-2) (1995), pp.15-33.
- [18] Battjes J.A.; Janssen J.P.F.M.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16 th Int.Coasta.Eng.Conf.Am.Soc.Civ.Eng*, pp. 569-587, 1978.

Smjernice za definiranje hidrograma velikih voda

Josip Husajina¹, doc. dr. sc. Damir Bekić²

¹Elektroprojekt d.d., josip.husajina@elektroprojekt.hr

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

Sažetak

Definiranje projektnog hidrograma velikih voda je temelj za različite mjere i djelatnosti unutar područja zaštite od štetnog djelovanja voda. U hrvatskoj hidrološkoj praksi često se standardne metode koriste nekritički budući da ne postoje smjernice za njihovo korištenje. Postoji potreba za unaprjeđenje postojeće prakse. Primjenom suvremenih spoznaja i metoda analize velikih voda, a posebice metode krivulja učestalosti poplava upotrebom QMED indeksa, planira se izraditi smjernice te razviti novi model za definiranje hidrograma velikih voda.

Ključne riječi: hidrološki modeli, QMED indeks, hidrogram, velike vode

Guidelines for defining a high-water hydrograph

Abstract

Defining a high-water project hydrograph is the basis for various measures and activities within the field of protection against harmful effects of water. Standard methods are often used uncritically in Croatian hydrological practice since there are no guidelines for their use. There is therefore a pressing need to improve existing practices. By applying modern knowledge and methods of high-water analysis, and especially the method of flood frequency curves using the QMED index, plans are currently prepared to develop guidelines and a new model for defining high-water hydrographs.

Key words: hydrological models, QMED index, hydrograph, high waters

1 Uvod

Potreba čovjeka za proučavanjem prirodnih procesa kruženja i djelovanja vode u okolini, obranom od djelovanja velikih voda i gradnjom hidrotehničkih sustava postoji od samih početaka razvoja civilizacija kao temelj ostvarivanja uvjeta egzistencije (slika 1.). Izučavanje slivova kao temeljnih jedinica svih hidroloških pojava i procesa predstavlja osnovu za obavljanje ovih djelatnosti [1]. U suvremenom dobu primjenom dostupnih znanja izvodi se aproksimacija stvarnog sustava otjecanja vode sa sliva u obliku sklopa fizikalnih, kemijskih i/ili bioloških procesa koji djeluju s obzirom na ulaznu varijablu ili varijable i pretvaraju ih u izlaznu varijablu ili varijable [2]. Ovaj skup radnji u praksi pojednostavljeno nazivamo hidrološkim modelom. Za modeliranje se koristi određena metoda (hidrološki model) čiji su ulazi efektivne oborine (I_{Pe} , Pe), određene karakteristike tla te fizička obilježja sliva, a izlaz je hidrogram direktnog otjecanja (Q_d). Koriste se različiti hidrološki modeli koji se razlikuju po razini pojednostavljenja, osnovnim pretpostavkama i potrebnim ulaznim parametrima. Definiranje mjerodavnih parametara za uspostavu hidroloških modela, kao i postupci kalibracije u uvjetima kakvi prevladavaju na kontinentalnom području Hrvatske, čine temu ovog doktorskog rada.



Slika 1. Poplava u Zagrebu 1964. godine uzrokovana dugotrajnim kišama u gornjim tokovima rijeke Save

Istraživanje se provodi kroz tri osnovne logičke cjeline: povijesni pregled i detekcija pogrešnih primjena različitih metoda za definiranje hidroloških modela, analiza i ishođenje korekcija za primjenu postojećih metoda te implementacija novijih metoda. Na temelju rezultata kao konačnih produkata navedenih radnji postoji mogućnost za razvojem novog modela. U istraživačkome radu od novijih metoda posebno će se razmatrati krivulja učestalosti poplava upotrebom indeksa medijana maksimalnih godišnjih zabilježenih događaja velikih voda (Priručnik za procjenu poplava, Velika Britanija, QMED-index).

2 Važnost područja istraživanja

U Hrvatskoj postoji problem s nedostatkom mjerenja hidroloških podataka na slivovima. Zbog toga se za potrebe dimenzioniranja hidrotehničkih građevina primjenjuju različite teorijske metode koje opisuju hidrološke režime na slivovima. Identifikacija hidroloških režima postaje teža ako su i postojeća mjerenja oskudna i nisu kontinuirana. Unatoč konstantnoj nesigurnosti u predviđanju prirodnih pojava, matematički je moguće statistički definirati procjenitelje koji analiziraju postojeće stanje sustava te dati naznaku trenda njihovih glavnih obilježja. Studije odnosa oborina i otjecanja, tzv. *rainfall-runoff* (RR) modeli, dolaze sve više do izražaja zbog boljih mogućnosti implementacije postojećih podataka. RR modeli čine skup različitih matematičkih principa koji pokušavaju opisati karakteristike riječnog bazena s određenim pretpostavkama koje se temelje na parametrima kao što su oblik krivulje recesije, površina otjecanja, odnos brzog i sporog otjecanja, količina vode u tlu i slično [3]. Ako se ulazni parametri uspješno odaberu i testiraju mogu dobiti traženi smisao u vidu opisivanja regionalnih karakteristika područja.

Iako postoje različite teorijske metode koje su zasad prisutne kao inženjerska praksa u Hrvatskoj, upitna je opravdanost njihove primjene s obzirom na mnogobrojne koeficijente, često nejasne samom korisniku i "zastarjele" tehnike implementacije. Mnoge države imaju potpuno jasan i definiran proces definiranja te kalibracije hidroloških modela ovisno o regijama. U Hrvatskoj takva sustavnost ne postoji pa se u struci odabir tehnike, odnosno, odabir metode predviđanja hidrološkog otjecanja sa sliva prepušta iskustvu samog korisnika. Kroz dosadašnje istraživanje i analizom objavljenih hidroloških studija te vlastitih projekata uočen je veliki prostor za povećanje pouzdanosti hidroloških modela. Bitno je napomenuti da je većina teorijskih metoda kojima se nadalje definiraju hidrološki modeli u domaćoj struci, razvijena u zemljama koje se uvelike razlikuju po meteorološkim i orografskim uvjetima u odnosu na hrvatske prilike. Na taj način, sami koeficijenti, odnosno parametri koji definiraju takve modele su upitne točnosti te mogu prouzročiti značajna odstupanja od stvarnih rezultata ako se ne znaju dobro interpretirati i prilagoditi. Upravo je u tome važnost odabrane teme istraživanja.

Hidrogrami otjecanja sa slivova koji predstavljaju temelj za dimenzioniranje građevina kako za zaštitu od štetnog djelovanja vode tako i za zaštitu voda od štetnog utjecaja čovjeka te njeno korištenje, ako nisu na točan način determinirani mogu izazvati ili ekonomske štete ili štete za ljudski život i materijalna dobra. Također, metode modeliranja hidroloških procesa se godinama sustavno unapređuju i doraduju paralelno s novim otkrićima i tehnologijama koje omogućuju sve bolje i naprednije analiziranje pojedinih parametara. Analiza i primjenjivost novih spoznaja i postignuća uvelike ovise o daljnjim razradama i ispitivanjima na što raznolikijim područjima i u što raznolikijim uvjetima [4]. Ova činjenica također govori o važnosti

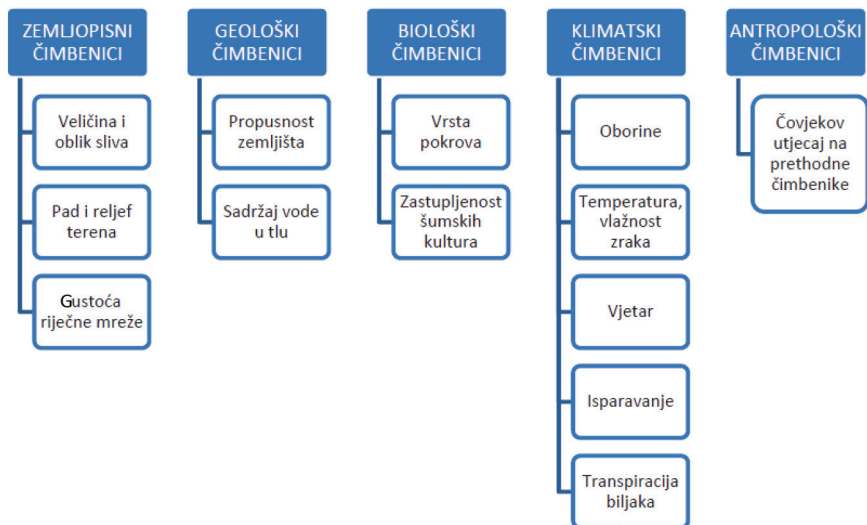
preispitivanja postojećih metoda te upotrebe novih parametara i razvijanja metoda koje u konačnosti definiraju model hidrološkog otjecanja. Cilj istraživačkog rada je determinirati postupak hidrološkog modeliranja za prilike koje prevladavaju na malim slivovima u kontinentalnoj Hrvatskoj analizom, prilagodbom i unaprjeđenjem postojećih metoda s pripadnim ulaznim parametrima. U konačnici shodno novo dobivenim spoznajama i otkrićima kao produktima procesa znanstvenog istraživanja, postoji i mogućnost za definiranje novog hidrološkog modela predviđanja otjecanja na malim slivovima.

3 Metodologija

U proučavanjima hidroloških značajki nekog sliva najvažniji element predstavlja otjecanje. Za pouzdano utvrđivanje dugogodišnjeg vodnog režima nekog vodotoka, pri rješavanju inženjerskih hidrotehničkih – i ne samo hidrotehničkih problema – potrebno je poznavati, odnosno biti upućen u odnose između poznatih podataka o oborinama i otjecanja sa sliva [1]. Ovi podaci se dobivaju iz hidroloških i meteoroloških postaja smještenih na samome proučavanome slivu. U ovome slučaju provodi se statistička obrada dugogodišnjeg niza podataka na temelju koje se definiraju rezultati o otjecanju sa sliva. Te slivove nazivamo izučenim slivovima. Kada na proučavanome slivu ne postoje hidrološke, odnosno meteorološke postaje, pristupa se proračunu izlaznog hidrograma temeljenog na raznim parametrima izraženim preko teorijskih izraza. Te slivove nazivamo neizučenim slivovima. U hrvatskoj inženjerskoj praksi najučestalije teorijske metode za definiranje hidrograma otjecanja s malih slivova su: Srebrenovićeve metoda, racionalna metoda, metoda Ven Te Chowa te metoda jediničnog hidrograma. Mali sliv se definira kao onaj čija je površina manja od 1000 km², a češće se naziv mali sliv odnosi na slivove čija je površina manja od 400 km² [1]. Kako bi se mogla odrediti pouzdanost pojedinih metoda na slivovima sličnih karakteristika, potrebno je prikupiti što veći uzorak odnosa rezultata teorijskih metoda sa stvarno zabilježenim i statistički obrađenim podacima. Reprezentativan uzorak je naravno moguće postići samo ako postoji dovoljan broj izučenih slivova na kojima će se verificirati teorijske metode.

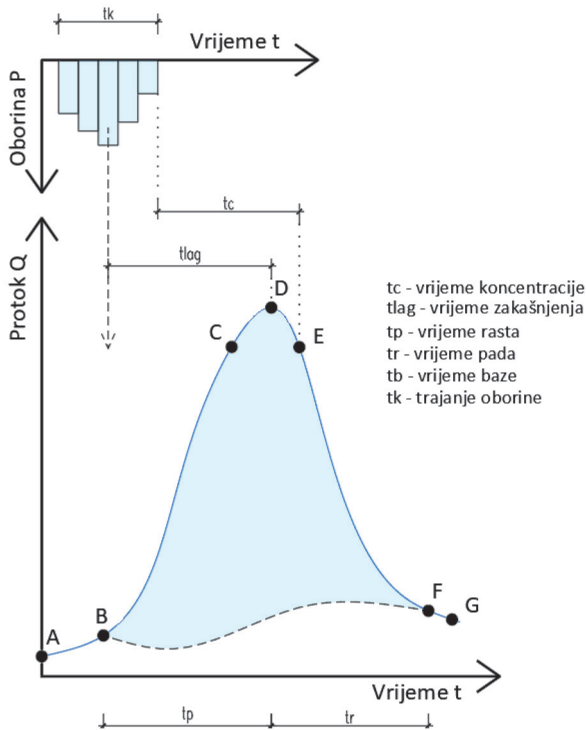
3.1 Analiziranje izučenog sliva

Otjecanje sa sliva ovisi o nizu čimbenika kao što su: zemljopisni, geološki, biološki, klimatski i antropološki [1].



Slika 2. Čimbenici koji utječu na otjecanje sa sliva [10] (I. Sušan, 2015.)

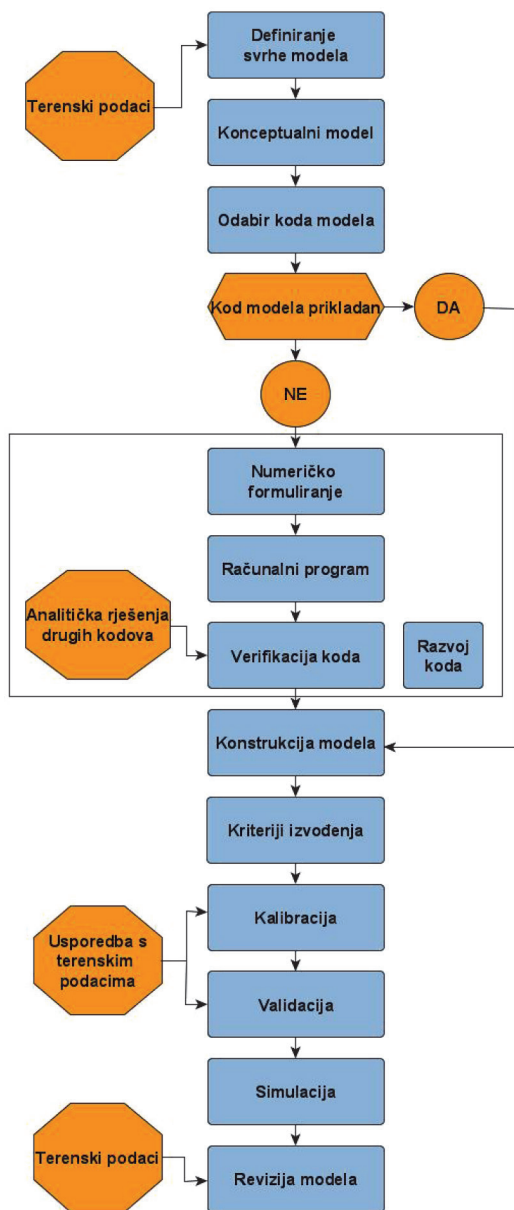
Svi navedeni čimbenici prikazani na slici 2. utječu u konačnici na formiranje hidrograma otjecanja sa sliva te ih je s toga potrebno analizirati i interpretirati u skladu sa zabilježenim hidrološkim i meteorološkim mjerenjima. Uz analiziranje čimbenika koji formiraju hidrogram otjecanja, analizira se i oblik samog hidrograma kao produkta zabilježenih mjerenja sa svojim temeljnim karakteristikama: vremenom rasta, vremenom pada, vremenom baze hidrograma, vršnim protokom, vremenom koncentracije i vremenom zakašnjenja. Ova analiza je ključna radi kasnije usporedbe s teorijski dobivenim hidrogramima. Teorijskim metodama definiranja hidrograma koriste se razni teorijski izrazi kojima se aproksimiraju navedene karakteristike hidrograma i na taj način definiraju njegov oblik (slika 3). Upravo na temelju vrijednosti dobivenih ovim izrazima nadalje se formiraju hidrološki modeli neizučениh slivova.



Slika 3. Hidrogram direktnog otjecanja - teorijski model

3.2 Analiziranje teorijskih metoda na izučenom slivu

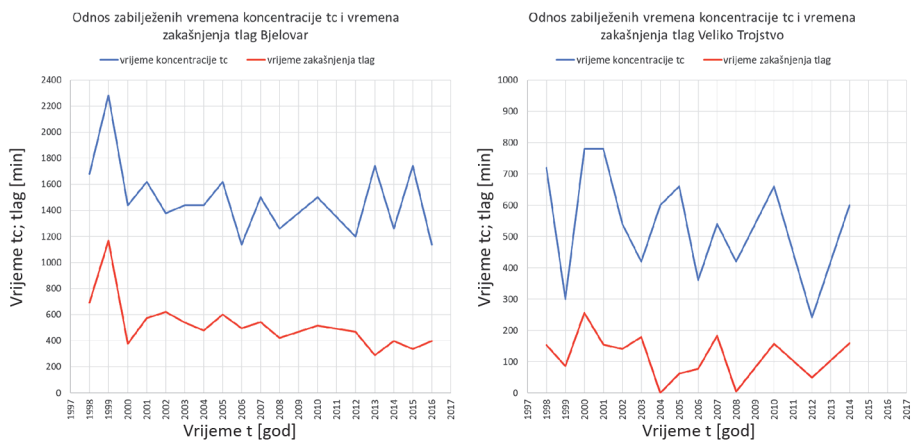
Kako bi se mogla verificirati, odnosno odrediti pouzdanost pojedinih teorijskih metoda definiranja hidrograma otjecanja na slivovima sličnih karakteristika, potrebno je analizirati korelaciju izlaznih rezultata sa zabilježenim stvarnim mjerenjima. Za potrebe ovoga rada bit će prikazana korelacija rezultata dobivenih primjenom jednostavne racionalne metode te metode jediničnog hidrograma u odnosu na stvarno zabilježene vrijednosti iz dugogodišnjeg niza mjerenja. Vrijednosti analiziranih parametara odnosit će se na: utjecaj vremena koncentracije i utjecaj vremena zakašnjenja. Dakle, parametri koji nisu varijabilni u ovim analizama su intenzitet oborine i koeficijent otjecanja, dok su vremena koncentracije odnosno vremena zakašnjenja varijabilni parametri. U daljnjem istraživanju analizirat će se znatno veći broj parametara kao što su: utjecaj intenziteta oborine, utjecaj koeficijenta otjecanja i dr. Nakon odabira prikladne metode i parametara koji su njen sastavni dio, pristupa se izradi hidrološkog modela po modificiranom Refsgaardovom postupku [5], a njegov je dijagram toka prikazan na slici 4.



Slika 4. Dijagram toka metodologije za razvoj hidrološkog modela; modificirani prikaz izradio Josip Husajina prema Refsgaardu (1996.)

4 Rasprava

Usporedbom dobivenih hidrograma otjecanja teorijskim putem te hidrograma prema zabilježenim i statistički obrađenim podacima [6], prikazana je analiza korelacije vremena koncentracije i vremena zakašnjenja na primjeru sliva rijeke Bjelovacke (slika 5). Referentni podaci su dobiveni iz dvije hidrološke postaje koje se nalaze na ovome slivu: Bjelovar i Veliko Trojstvo. Površina sliva iznosi 80 km² te prema teoriji [1] ubraja se u male slivove. Vrijeme koncentracije je vrijeme potrebno da voda, koja otječe površinski, stigne od najudaljenije točke sliva do izlaznog profila sliva [1]. U praksi se najčešće ovim vremenom smatra vrijeme od kraja hijetograma efektivne oborine do točke infleksije na silaznoj grani hidrograma direktnog otjecanja. Ipak, neki autori su pomnije pristupili diskutabilnom karakteru ovog pojma te ga za male slivove definiraju kao vrijeme od kraja efektivne oborine do kraja hidrograma direktnog otjecanja [7]. Ovakvo poimanje vremena koncentracije se u analizama pokazalo kao točnije [6]. Vremenom zakašnjenja smatra se vrijeme od težišta hijetograma efektivne oborine do vrha hidrograma direktnog otjecanja.



Slika 5. Odnos zabilježenih vremena koncentracije i vremena zakašnjenja (J. Husajina, 2018.)

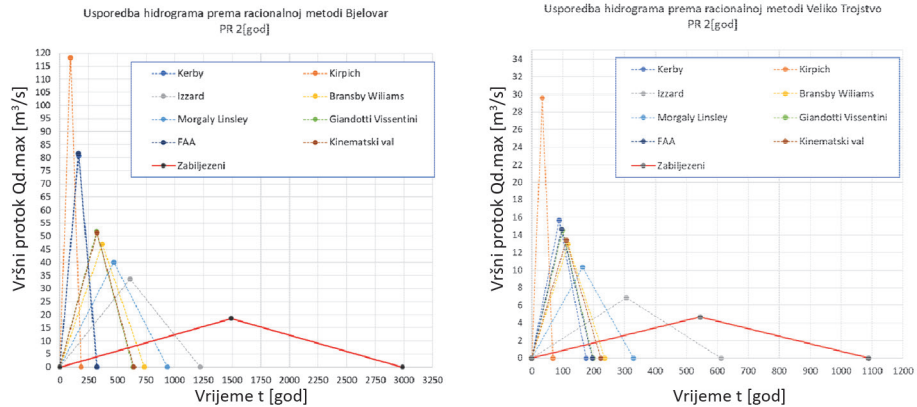
Teorijsko vrijeme koncentracije se razmatra prema osam najučestalijih izraza: Kerby, Kirpich, Izzard, Bransby Wiliams, Morgali Linsley, Giandotti Vissentini, FAA te izrazu kinematskog vala. Odnos zabilježenih prosječnih vremena koncentracije s izračunanim vremenima preko navedenih izraza prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba teorijski dobivenih vremena koncentracije sa zabilježenim prosječnim vremenom koncentracije

Metoda proračuna vremena koncentracije	Vrijeme koncentracije t_c [min]	
	Veliko Trojstvo	Bjelovar
Kerby	88,04	163,04
Kirpich	33,81	91,77
Izzard PR 2 [god]	306,06	610,64
Izzard PR 10 [god]	191,35	381,36
Izzard PR 50 [god]	142,00	282,83
Izzard PR 100 [god]	127,60	254,08
Bransby Williams	117,46	367,50
Morgali Linsley PR 2 [god]	164,46	468,04
Morgali Linsley PR 10 [god]	132,77	377,65
Morgali Linsley PR 50 [god]	115,86	329,48
Morgali Linsley PR 100 [god]	110,33	313,72
Giandotti Vissnetini	98,99	317,79
FAA	97,50	160,32
Kinematski val PR 2 [god]	111,08	322,34
Kinematski val PR 10 [god]	89,69	260,14
Kinematski val PR 50 [god]	78,28	226,98
Kinematski val PR 100 [god]	74,55	216,13
Zabilježeni prosječni hidrogram	544	1493

Prema teorijskim obrascima uočeno je da su na primjeru sliva rijeke Bjelovacke vremena koncentracije 2,5 – 7 puta manja od prosječnih zabilježenih vremena koncentracije. Posljedično, u daljnjoj razradi teorijskog hidrograma prema racionalnoj metodi iscrtavaju se jednostavni hidrogrami s vremenom baze $t_b = 2t_c$ u kojima se mogu uočiti velika odstupanja vremena baze hidrograma i vršnog protoka u odnosu na hidrogram formiran iz zabilježenih mjerenja (slika 6).

Što se tiče teorijske metode jediničnog hidrograma, koja u svojoj definiciji izražava vrijeme zakašnjenja kao $t_{lag} = 0,6 \cdot t_c$, već u ovome početnom koraku može se primijetiti odstupanje. Naime, ako se vratimo na sliku 5 u kojoj su prikazani zabilježeni odnosi vremena koncentracije i vremena zakašnjenja na primjeru sliva rijeke Bjelovacke, ova relacija bi se zapravo trebala kretati u vrijednostima $t_{lag} = (0,2-0,35) \cdot t_c$, **što je više nego dvostruko** manji omjer u odnosu na omjer definiran teorijom. Već ovim razmatranjem se može utvrditi potreba za sustavnom analizom postojećih teorijskih metoda te definiranjem smjernica za izradu modela hidrograma otjecanja.



Slika 6. Usporedba jednostavnih hidrograma otjecanja za različita vremena koncentracije

S druge pak strane, u Velikoj Britaniji se već godinama sustavno razvija metoda definiranja krivulje učestalosti poplava kojom se jasno definiraju ekstremni događaji po povratnim razdobljima upotrebom QMED indeksa. QMED indeks (medijan godišnjih maksimalnih protoka) zapravo predstavlja svojstva specifičnog sliva, odnosno magnitudu mogućeg poplavnog događaja na promatranome slivu. Velika je vjerojatnost da krivulja rasta amplitude poplavnog događaja bude slična na mnogim slivovima koji imaju slične hidrogeološke karakteristike. Prema tome, krivulja rasta za promatrani sliv može biti procijenjena kombinirajući krivulje rasta iz baze sličnih slivova koji se čak nužno ne nalaze unutar istoga geografskog područja [8]. QMED može biti određen ako postoji dovoljno dug niz mjerenja (više od 13 godina). Ako mjerenja ne postoje, onda se određuje regresijskim jednadžbama koje u sebi sadrže obilježja sliva kao što su: površina sliva, koeficijent otjecanja, klasifikacija hidrološke grupe tla, standardna godišnja prosječna oborina. Zbog nepouzdanosti procjene QMED-a iz karakteristika sliva, radi se kalibracija preko sliva donora koji ima slične karakteristike te ujedno sadrži dovoljno dugačak niz hidroloških mjerenja [8]. Upravo je u tome zanimljivost i važnost ovoga dijela istraživačkoga rada. Naime, ako se stvori dovoljno velika baza podataka kojima se definira QMED indeks, mogu se relativno brzo definirati mogući ekstremni događaji na promatranom slivu iteracijom podataka sa drugih slivova donora. Ti slivovi čak ne moraju biti u istom geografskom području već je dovoljno da budu slični u hidrološkome smislu. Navedena metoda može u početnim fazama razvoja poslužiti kao provjera klasičnijim teorijskim metodama definiranja hidroloških događaja koje su sastavni dio ovoga istraživačkoga rada. Ova metoda se osim u Velikoj Britaniji počela primjenjivati i u Sjedinjenim Američkim Državama, Irskoj, Africi, Aziji te još ponekim europskim zemljama s ciljem razvoja softverskog alata koji će sadržavati bazu podataka potrebnu za kalibraciju ove metode [4]. Konačna namjera je dobiti alat za brzo i jednostavno definiranje događaja velikih voda na neizučnim slivovima. Ovime se izražava dodatan doprinos planiranog istraživačkoga rada ne samo na razini Hrvatske već i na globalnoj razini.

5 Zaključak

U ovome je radu sažeto opisan novi pristup za poboljšanje kvalitete izrade projektnog hidrograma velikih voda na malim slivovima. Metodologija istraživačkog rada bazirat će se na malim slivovima koji se odnose na područje slivova Save, Drave i Duna. Ti slivovi čine više od polovine slivova u Hrvatskoj te su stoga od posebnog interesa [9]. Znanstveni doprinos predloženog istraživanja ogleda se u implementaciji metoda za definiranje ekstremnih događaja velikih voda koje do sada nisu primjenjivane u Hrvatskoj, a ujedno su od značaja za poboljšanje kvalitete i točnosti izrade projektnih hidrograma i na globalnoj razini. U ovome radu je tek malim dijelom prikazano da gotovo sigurno izlazni rezultati ne mogu biti pouzdani ako se prilikom izrade teorijskih hidroloških modela velikih voda upotrebom različitih teorijskih metoda ne pristupi analitički i kritički. Izradu hidrološkog modela znatno bi olakšale definirane smjernice kojih bi se projektanti pridržavali za potrebe svojih analiza. U ovome ujedno leži stručni doprinos predloženog istraživačkog rada. Iz svega navedenoga nameće se cilj rada koji obuhvaća definiranje smjernica za dobivanje realnijeg hidrograma otjecanja nekog sliva te razvoj nove metode (hidrološkog modela). Pouzdanost rezultata istraživačkog rada ovisit će uvelike o točnosti i kontinuiranosti dostupnih mjerenja na izučenim slivovima. Kako bi se uklonile nepouzdanosti, važno je stvoriti bazu sa što većim brojem obrađenih slivova koji će si sami međusobno poboljšavati točnost parametara na temelju hidrogeoloških sličnosti.

Literatura

- [1] Žugaj, R.: Hidrologija, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2015.
- [2] Dodge, J.: Linear theory of hydrologic system, Washington, D.C.: USA: Technical Bulletin No1468., Agricultural Research Service, 1973.
- [3] Željковиć, I.: Identifikacija hidroloških režima otjecanja u kršu konceptualnim i parametarskim modelima, Split: Sveučilište u Splitu Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, doktorska disertacija, 2015.
- [4] Kjeldsen, T.: How reliable are design flood estimates in the UK?, Journal of Flood Risk Management, pp. 237-246, 2015.
- [5] Refsgaard, J.: Hydrological Modelling and River Basin Management, Copenhagen: Geological Survey of Denmark and Greenland, Danish Ministry of the Environment, Doctoral Thesis, 2007.
- [6] Husajina, J.: Analiza direktnog otjecanja na slivu rijeke Bjelovarske, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, diplomski rad, 2018.

- [7] McCuen, R.: Uncertainty Analyses of Watershed Time Parameters, *Journal of Hydrologic Engineering*, pp. 490-498, 2009.
- [8] Mansell, M.G.: *Rural and urban hydrology*, London: Thomas Telford Publishing, 2003.
- [9] Marušić, J.: Hrvatske vode-djelatnost i način rada, *Građevinar*, Vol. 51, br. 9, pp. 573-584, 1999.
- [10] Sušan, I.: Razvoj hidrološkog modela otjecanja s malih slivova temeljen na umjetnoj neuronskoj mreži, Rijeka: Sveučilište u Rijeci Građevinski fakultet, doktorska disertacija, 2016.

Review on concrete under combined environmental actions and possibilities for application to alkali activated materials

Ashfaque Ahmed Jhatial¹, Asst. Prof. Marijana Serdar², Assoc. Prof. Guang Ye³

¹ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, ashfaque.jhatial@grad.unizg.hr

² University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, marijana.serdar@grad.unizg.hr

³ Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Materials & Environment (Microlab), g.ye@tudelft.nl

Abstract

Alkali Activated Materials (AAMs), which are locally available alumino-silicate based materials, are emerging as alternative binders to Ordinary Portland Cement (OPC) due to higher performance and reduced carbon footprint. Before their implementation on a larger scale, their durability performance needs to be fully understood. The data on durability performance of AAMs under single environmental action are limited, and there are almost no data on their behaviour under two or more environmental actions. This article provides brief literature review on novel methods for determining durability of concrete under combined environmental actions, which could be utilised to determine the behaviour of AAMs under combined environmental actions.

Key words: durability; alkali activated materials; degradation mechanisms; combined environmental actions

Ponašanje betona pri kombiniranom djelovanju okoliša i mogućnosti primjene na alkalno-aktivirane materijale

Sažetak

Alkalno aktivirani materijali (AAM), koji su lokalno dostupni materijali na bazi alumino-silikata, postaju alternativa običnom portlandskom cementu (OPC) zbog poboljšanih svojstava i smanjenog ugljičnog otiska. Prije značajnije upotrebe u praksi, potrebno je u potpunosti razumjeti njihovo ponašanje u različitim okolišima. Postoje ograničeni podaci o dugotrajnom ponašanju AAM-a pod jednim djelovanjem iz okoliša i gotovo da nema podataka o njihovom ponašanju pri kombiniranom djelovanju dva ili više opterećenja iz okoliša. Ovaj rad daje kratki pregled literature o metodama za određivanje trajnosti betona pri kombiniranom djelovanju različitih opterećenja iz okoliša te osvrt na mogućnosti primjene za analizu otpornosti AAM-a.

Ključne riječi: trajnost, alkalno-aktivirani materijali, degradacijski mehanizmi, kombinirani utjecaj okoliša

1 Introduction

Cement has been the dominating binder in the construction industry since the last century, with an annual production of approximately 3 Gt [1]. To satisfy the demand of construction industry, cement has been produced at an exponential rate. The projections, based upon the current rate of cement consumption, suggest that approximately 4 Gt of cement per year will be produced in the next 40 years [2, 3]. Despite the benefits that the cement-based-concrete has provided to the humanity, it has a carbon footprint that poses serious environmental and health hazards. The production of cement releases greenhouse gases both directly and indirectly: the heating of limestone releases CO₂ directly, while the burning of fossil fuels to heat the kiln results in indirect CO₂ emissions. Around 0.9 tonnes of carbon dioxide (CO₂) are released during production of one tonne of ordinary Portland cement (OPC) [4, 5]. It has been estimated in various reports that cement industry contributes with 5% to 10% to the total global CO₂ gas emissions [6-9]. Apart from releasing contaminated gases into the atmosphere, cement industry also relies on natural resources [10]. In order to minimise CO₂ gas emissions, reduce depletion of natural resources, and achieve significant energy savings, great efforts have been invested to research and develop new cementitious materials that could potentially be used as alternatives to cement. Among the alternative materials that are currently under study a notable place is taken by alkali-activated materials (AAMs).

Alkali-activated materials (AAMs) are currently emerging low CO₂ alternative binders that could be utilized in the place of OPC. The AAMs are based on chemical reaction between an alkali metal source (solid or dissolved) and a solid (alumino-) silicate powder [11]. AAMs can be produced from a variety of aluminosilicate precursors depending upon user's demand for reactivity, cost, and value. AAMs are very versatile and can be developed using locally available materials, which is a significant advantage for countries abounding in such materials. On the other hand, any generalisation of AAMs is practically impossible due to the fact that properties of AAMs are highly dependent upon the type of precursor and activators. However, AAMs are a key aspect in the development of sustainable building materials for construction industry [12].

Since AAMs are being considered as potential alternative binding materials for concrete, and as they are used to construct large-scale structural elements, it is significant to understand their relevant durability performance under various deteriorating mechanisms. Furthermore, in real conditions, structural elements are not only subjected to a single deteriorating mechanism but also to multiple deteriorating mechanisms. Therefore, this work will shortly review the durability performance of AAMs and provide a brief overview of possible test methods that could be used for determining behaviour of AAMs under combined environmental actions.

2 Durability performance of alkali-activated materials

During their intended service life, concrete structures can be subjected to various environmental actions/loads, which have a direct effect on their service life. One of the main reasons for premature deterioration of concrete structures is that the compressive strength of concrete is given advantage over other performance qualities. There are many deteriorating processes and mechanisms that directly and indirectly influence durability of concrete structures and ultimately their service life. These deteriorating mechanisms are shown in Figure 1. Though water absorption and permeability of the matrix mostly govern the durability performance of both AAMs and OPC, it should be noted that their behaviour patterns under deterioration mechanisms are quite different. Furthermore, different reaction products of AAMs, such as C-A-S-H and N-A-S-H, formed depending upon the type of precursor and activator used, behave differently under various environmental actions. The deteriorating mechanisms that are critical for AAMs and that will be in the focus of the present paper are highlighted in green in Figure 1.

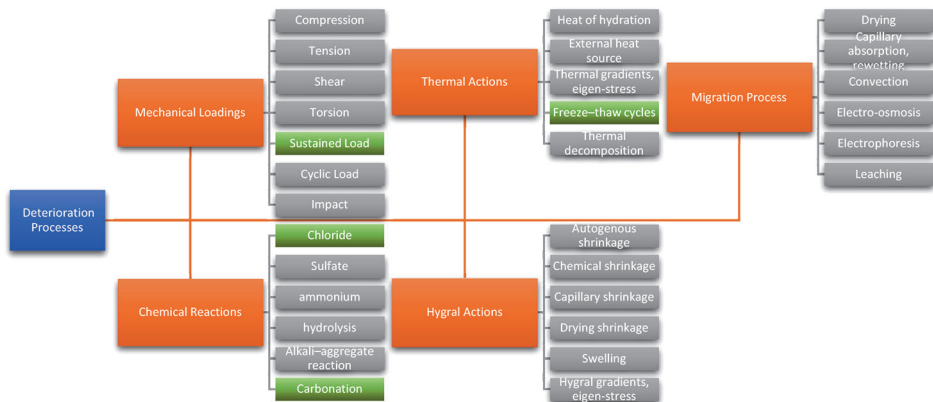


Figure 1. List of various deteriorating mechanisms [13]

2.1 Carbonation

If taken in consideration for OPC, carbonation is a chemical reaction that takes place between carbonic acid (developed in pore solution through dissociation of external CO_2 which penetrates into the matrix) and hydration products of the binder, thus producing carbonates within the paste [14]. This reaction causes a significant decrease in pH value of the paste. Both the reaction as well as its subsequential resultant cause the reinforcement within the concrete to become prone to corrosion. Carbonation is controlled by

- 1) diffusion through a fluid film,
- 2) diffusion through a solid product layer, or
- 3) chemical reaction at the particle surface [15].

It is significantly influenced by various factors such as relative humidity, atmospheric CO₂ concentration, pore network's tortuosity, and chemistry of binding phases and pore solution [16]. The mechanism of carbonation is quite different for AAMs, as it is highly dependent on chemical composition of materials used as binders, and the nature and concentration of activators that are to be used. Furthermore, the pH in AAMs is governed by the pore solution as compared to OPC in which the Portlandite is the controlling factor of pH. Thus, for AAMs, carbonation occurs in two stages: carbonation within the pore solution which results in pH reduction and precipitation of Na-rich carbonates, and the decalcification of gel and structure deterioration [17]. Bernal et al. [18] have established that subjecting AAM concrete to more than 1% CO₂ concentration under accelerated testing results in a significant reduction in service life, which indicates that AAMs are highly susceptible to carbonation when compared to OPC. This high carbonation has been attributed to the lack of portlandite, low Ca/Si ratio and high alkali content which, when coupled, increase the risks of carbonation through the decalcification of C-A-S-H to form calcium carbonates.

2.2 Chloride ingress

Although chlorides do not directly damage the concrete, they induce corrosion of reinforcing steel bars by damaging their passivated layer, which leads to a significant reduction in structural capability of structural elements. Chloride ions penetrate when concrete structures are in marine/coastal areas or when de-icing salts are used in cold regions. It has been reported that AAMs perform better with a reduced corrosion rate [19, 20] and that the chloride penetration depth is much lower [21] compared to OPC-based concrete. The low chloride diffusivity in AAMs has been attributed to better pore structure and enhanced chloride binding capacity of AAM concrete [22].

2.3 Freezing and thawing

In cold regions, durability of concrete structures is affected by two deteriorating mechanisms, namely, 1) damage due to repeated freezing and thawing cycles, and 2) scaling of concrete surface that is exposed to deicing salts [23]. The repeated cycles of freezing and thawing cause severe damage to concrete structures [24]. This damage is attributed to the nature of porous structure in concrete material (distribution and size of pores and capillaries and degree of saturation). AAMs have been studied for their resistance to freezing and thawing, and it has been found

that AAMs have a higher resistance to frost damage due to high compactness of the paste. Better resistance of AAMs to frost damage has also been reported by Cai et al. [25] and other authors, suggesting that the utilisation of AAMs in cold regions could potentially be beneficial.

3 Combined environmental actions on concrete

Though there are numerous methods that help in predicting durability and service life of reinforced concrete structures, in most of these methods, only one deterioration process is taken into account [26, 27]. In effect, these methods do not represent the actual situation the concrete and reinforced concrete structures face in real life. In practice, these structures are generally subjected to static or dynamic mechanical loads combined with environmental actions such as carbonation and chloride penetration [26]. Micro-cracks are developed in the porous and composite structure of concrete when mechanical loads such as compressive and tensile ones are applied [26]. These micro-cracks act as a medium through which chloride and CO_2 can enter the concrete matrix. Hence the rate of carbonation and chloride penetration will be accelerated, resulting in reduction of service life of structures under the combined effect of mechanical and environmental actions [26].

Another example that may elucidate synergetic effects of combined environmental actions is that the structures in cold regions are not only subjected to freezing-thaw damage but are also influenced by erosion due to atmospheric carbon dioxide (CO_2) [28]. These combined environmental effects cause structural damage due to freeze-thaw cycles and carbonation of concrete, resulting in complex actions that affect durability of concrete structures in cold regions [29]. Synergetic effects of combined loads on structures have been greatly neglected [26]. The earliest record on combined actions research dates back to 1986 [26, 30-33]. As shown in Figure 1, there are many possible combinations, as structures may be affected by two or more than two loads simultaneously and/or consecutively. This research aims to consider the potential synergetic effect of the combination of environmental and mechanical actions, which is a more realistic loading scenario. Although there are no standardised testing methods for determining durability performance of concrete subjected to combined environmental actions, many researchers have conducted the testing using two approaches: 1) consecutive loading, and 2) simultaneous loading.

3.1 Consecutive loading

A possible method of subjecting concrete structures to combined aggressive attacks is to apply environmental attacks alternatively or consecutively one after another. It has been observed from previous individual freezing-thawing tests that repeated

cycles cause significant internal damage due to crystallisation of ice and expansion, causing cracks to develop. As cracks form, they create additional pathways for the aggressive elements such as chloride ions, sulphates, and carbonation, which penetrate to the matrix causing further damage. Previous researchers have taken this into account while testing concrete, by applying environmental attacks alternatively to determine durability performance of concrete. A summary of previous studies on alternative aggressive environmental attacks on concrete is presented in Table 1. It can be observed from Table 1 that more severe damage compared to that caused by single attack occurs when concrete is subjected to combined environmental actions in a consecutive manner. It can further be observed that the sequence in which the environmental attacks are applied is also quite significant. Though these results are encouraging and indicate that the concrete performance under combined environmental actions should be given higher priority than is presently the case, the alternative application of environmental attacks does not represent actual loads concrete structures are subjected to.

Table 1. Summary of previous studies on consecutive loading

Deterioration mechanisms and application method	Remarks	Ref
Carbonation, freezing-thawing cycles and compressive strength Single environmental attacks (C, FTC) and then compressive strength Alternative environmental attacks (FTC-C and C-FTC) and then compressive strength	Alternative environmental attacks caused severe damage compared to individual attacks. Initially, the carbonation was beneficial; however, repetitive alternative cycles generated cracks due to ice crystallisation and CaCO_3 expansion.	[34]
Freezing-thawing cycles, carbonation and chloride attack FTC with and without salts, C and CP Alternative C and CP	Depth of carbonation increased with an increase in the number of FTC due to internal deterioration which produced surface cracks, through which atmospheric CO_2 penetrated. Chloride migration increased with an increase in FTCs due to microcracks, but only for high w/b ratios. The presence of chlorides reduced the influence of carbonation; as a result, lower carbonation depth was observed compared to samples without chloride exposure. However, if carbonation is done first, it increased chloride depth.	[35]
Carbonation and freezing-thawing cycles and flexural strength 14 days C and 100 cycles under FTC, 100 cycles under FTC and 14 days of C	The order in which samples were subjected to attacks had significant influence, as rapid loss in flexural strength was reported when FTC was done first; this was attributed to the expansion and osmotic pressures caused by water as well as the linking of pores during FTC.	[36]
Freezing-thawing cycles, carbonation and chloride penetration Initially subjected to 0, 50 and 150 FTC, Then subjected to 0, 1, 2 weeks under C, and then CP	It was observed that coupled attacks caused service life to reduce significantly compared to single attack. Furthermore, both the amount and depth of carbonation increased when concrete was exposed to FTC. The exposure to FTC resulted in internal damage and cracking, which facilitated the ingress of carbonation; this in return caused pore size distribution to shift and thus resulted in an increase in chloride.	[37]

Deterioration mechanisms and application method	Remarks	Ref
Carbonation, freezing-thawing cycles and cyclic loading First samples subjected to five cycles of loading and unloading at different stress levels (0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 and 0.8 of fc) and then subjected to alternative environmental attacks (0, 25 and 50 F or C)	The volume fraction of small pores decreases upon an increase in loading, causing the porosity of concrete to increase. The influence of porosity was observed when concrete was subjected to FTC, in which case an increase in porosity caused a decrease in resistance to FTC. The increase in stress levels also influenced the depth of carbonation, as it was observed that the carbonation depth decreased while the stress level was below the 20% peak stress, but the carbonation depth rapidly increased as the load increased beyond 20% peak stress.	[38]
Note: FTC = freezing and thawing Cycles, C = Carbonation, CP = Chloride Penetration		

3.2 Simultaneous loading

It can be observed from previous section that a lot of work has been conducted on alternative effects on concrete involving consecutive deteriorating mechanisms such as chloride penetration, carbonation, freezing-thawing and mechanical loadings. However, some researchers caution that application of consecutive loads still does not represent real-life scenarios concrete can be exposed to. Therefore, novel setups have been developed for simultaneous application of deterioration mechanisms. Previous studies on simultaneous loadings are summarised in Table 2, while novel setups introduced by various researchers for determining durability of concrete under combined environmental actions are presented in Figure 2.

Table 2. Summary of previous studies on simultaneous loading

Deterioration mechanisms	Stress ratio [s]	Remarks	Ref
Chloride penetration under compressive loading	0.3, 0.5, 0.7 fc	12% loss in strength was observed	[39]
Chloride penetration under compressive loading and curing age	NAC: 0.2, 0.4, 0.6 fc RAC: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 fc	The chloride diffusion coefficient of RAC and NAC decreased at different stress levels. However, 0.8fc for RAC showed an increase in chloride diffusion.	[40]
Chloride penetration under sustained compressive and tensile loading	Various Stress ratios for both compressive and tensile	An initial increase in compressive stresses resulted in a decrease in chloride diffusion; however, further increase showed an increase in chloride diffusion. The application of tensile stresses resulted in a gradual increase in chloride diffusivity.	[41]
Chloride penetration under sustained compressive loading	0, 0.25, 0.50, 0.75 fc	It was observed that lower load had little influence on the chloride ingress in concrete. However, when the load was 0.75fc, a great difference in chloride transport was observed.	[42]
Freezing and thawing under sustained flexural loading	0, 0.17, 0.50 of flexural strength	Acceleration in surface scaling of concrete was observed with an increase in stress level.	[43]

Deterioration mechanisms	Stress ratio [s]	Remarks	Ref
Sulphate attack under sustained flexural loading	0, 0.2, 0.4, 0.6 of flexural strength	It was observed that ettringite and gypsum were formed under combined loading during wet cycles, and thus the combined attack could modify microstructural properties of concrete during the drying cycle.	[44]
Freezing and thawing under sustained loading	0, 0.36, 0.54, 0.72 of flexural strength	Sustained loading had minimum effect on the mass loss and surface damage, though a higher loading level caused greater damage due to freezing-thawing cycles, and relative dynamic modulus of elasticity decreased significantly. Flexural strength decreased gradually with an increase in the number of freezing-thawing cycles.	[45]

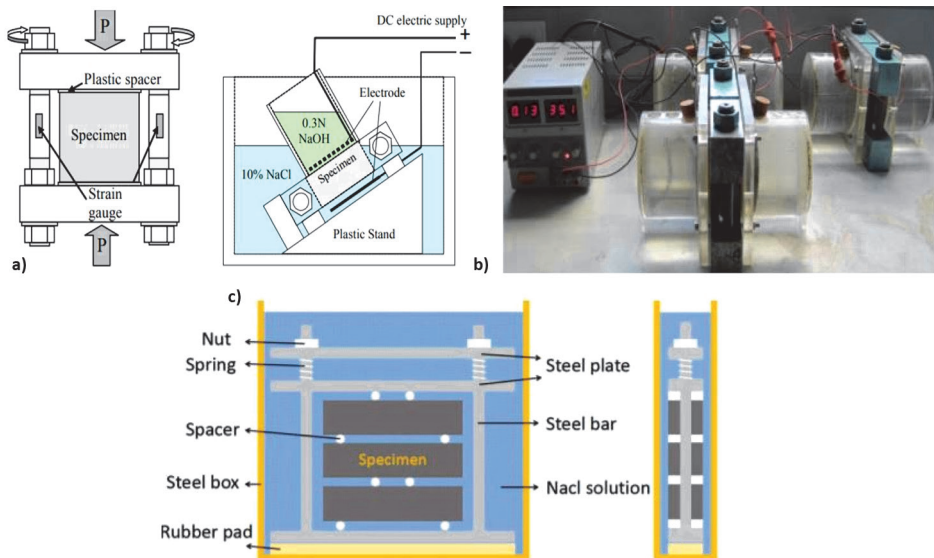


Figure 2. Illustration of setup for: a) chloride penetration under sustained compressive stresses [39]; b) modified chloride penetration under sustained compression [42]; c) freezing and thawing with de-icing salts under sustained flexural loading [45]

4 Research Outlook

Brief review presented in the paper shows that there is no standardised testing method for combined mechanical and environmental actions. However, by using specially designed test setups and loading devices, as well as the currently standardised individual testing methods for chloride, carbonation and freezing-thawing, it is possible to determine the durability of concrete that describes relatively well

the actions to which concrete structures may be subjected to in real-life scenarios. The focus of future research will be on studying the influence of combined environmental actions on AAMs, taking into consideration in the first step the freezing and thawing under tensile stress. This can be achieved by prestressing the concrete, i.e. by artificially creating stresses in structural elements such that they become permanent and more favourable/efficient. The concrete will be prestressed by up to 70% of the tensile strength of prestressing cables and, after the specified curing, concrete samples will be cut into smaller specimens and subjected to a specified number of freezing and thawing cycles. After the cycles, the internal damage and surface scaling will be determined as shown in Figure 3.

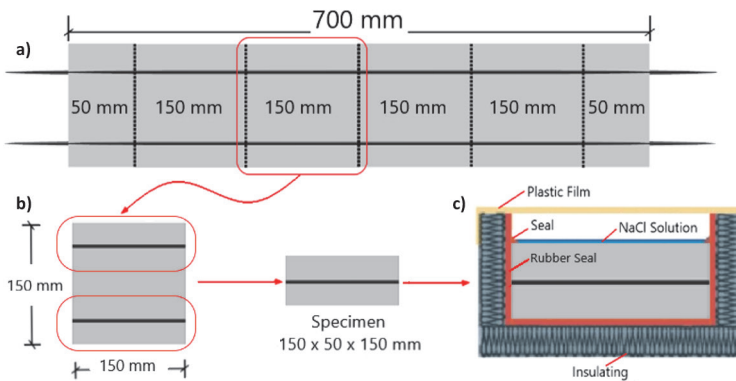


Figure 3. a) Prestressed beam; b) cutting of specimens; c) Freezing thawing test setup

AAMs are being considered as a potentially sustainable alternative to OPC due to their engineering characteristics. However, it is a relatively new material, and the data on its durability performance are limited. Furthermore, AAMs are to be utilised on a large scale, and as OPC based concrete structures are exposed to combined mechanical and environmental actions, the same will apply to AAM based structures as well. It is, therefore, necessary to determine the durability performance of AAMs subjected to combined mechanical and environmental actions.

Acknowledgement

Research presented in this paper was performed within the DuRSAAM project, which has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the grant agreement No 813596.

References

- [1] Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A. F., Jamshidi, M. & Ding, Y. (2012). Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue?. *Construction and Building Materials*, 30, 400-405.
- [2] International Energy Agency. (2009). *Cement Technology Roadmap 2009 Carbon emissions reductions up to 2050*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- [3] USGS (2016) *Mineral Commodity Summaries 2016*. Reston, VA: U.S. Geological Survey.
- [4] Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete research*, 34(9), 1489-1498.
- [5] Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D. & Gartner, E. M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and concrete research*, 38(2), 115-127.
- [6] Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195.
- [7] Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Engineering*, 95(95), 305-320.
- [8] Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E. & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of cleaner production*, 51, 142-161.
- [9] Ali, M. B., Saidur, R. & Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252-2261.
- [10] Torres-Carrasco, M. & Puertas, F. (2017). Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers. *Revista ingenieria de construccion*, 32(2), 05-12.
- [11] Zhang, S., Li, V. C., & Ye, G. (2020). Micromechanics-guided Development of a Slag/ Fly ash-based Strain-hardening Geopolymer Composite (SHGC). *Cement and Concrete Composites*, 109, 103510.
- [12] Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40-48.
- [13] Wittmann, F. H., Zhao, T., Jiang, F. & Wan, X. (2012). Influence of combined actions on durability and service life of reinforced concrete structures exposed to aggressive environment. *Restoration of Buildings and Monuments*, 18(2), 105-112.

- [14] Marchi, M. & Costa, U. (2011). Influence of the calcium sulphate and w/c ratio on the hydration of calcium sulphotoaluminate cement. Proceedings of the 13th ICCI, Madrid, Spain.
- [15] Ji, L., & Yu, H. (2018). Carbon dioxide sequestration by direct mineralization of fly ash. In Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials (pp. 13-37). Woodhead Publishing.
- [16] Atiş, C. D., Bilim, C., Çelik, Ö. & Karahan, O. (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. Construction and building materials, 23(1), 548-555.
- [17] Arbi, K., Nedeljković, M., Zuo, Y. & Ye, G. (2016). A review on the durability of alkali-activated fly ash/slag systems: advances, issues, and perspectives. Industrial & Engineering Chemistry Research, 55(19), 5439-5453
- [18] Bernal, S. A., Provis, J. L., Brice, D. G., Kilcullen, A., Duxson, P. & van Deventer, J. S. (2012). Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry. Cement and Concrete Research, 42(10), 1317-1326.
- [19] Holloway, M., & Sykes, J. M. (2005). Studies of the corrosion of mild steel in alkali-activated slag cement mortars with sodium chloride admixtures by a galvanostatic pulse method. Corrosion science, 47(12), 3097-3110.
- [20] Torres Gomez, R., Aperador, W., Vera, E., Mejia De Gutierrez, R., & Ortiz, C. (2010). Study of steel corrosion embedded in AAS concrete under chlorides. Dyna, 77(164), 52-59.A
- [21] Bondar, D., Thompson, D., Nanukuttan, S., Soutsos, M., & Basheer, M. (2018). Resistance of alkali activated slag concretes to chloride environments.
- [22] Ma, Q., Nanukuttan, S. V., Basheer, P. M., Bai, Y., & Yang, C. (2016). Chloride transport and the resulting corrosion of steel bars in alkali activated slag concretes. Materials and Structures, 49(9), 3663-3677.
- [23] Matalkah, F. & Soroushian, P. (2018). Freeze thaw and deicer salt scaling resistance of concrete prepared with alkali aluminosilicate cement. Construction and Building Materials, 163, 200–213.
- [24] Shang, H., Song, Y. & Ou, J. (2009). Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles, Acta Mech. Solida Sin. 22 (3), 261–266.
- [25] Cai, L., Wang, H., & Fu, Y. (2013). Freeze–thaw resistance of alkali–slag concrete based on response surface methodology. Construction and Building Materials, 49, 70-76.
- [26] Yao, Y., Wang, Z. & Wang, L. (2012). Durability of concrete under combined mechanical load and environmental actions: A review. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 1(1-2), 2-15.

- [27] Yao Y. et al. (2017). Test methods to determine durability of concrete under combined environmental actions and mechanical load: final report of RILEM TC 246-TDC. *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 2, p. 123,
- [28] Ferreira, M., Kuosa, H., Leivo, M. & Holt, E. (2017). Concrete performance subject to coupled deterioration in cold environments. *Nucl. Eng. Des.*, vol. 323, pp. 228–234.
- [29] Schneider, U., Nägele, E. & Dumat, F. (1986). Stress corrosion initiated cracking of concrete. *Cem. Concr. Res.*, vol. 16, no. 4, pp. 535–544, Jul. 1986.
- [30] Hasan, M., Ueda, T. & Sato Y. (2008). Stress-Strain Relationship of Frost-Damaged Concrete Subjected to Fatigue Loading. *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 37–45.
- [31] Schnieder U. & Chen, S.-W. (1999). Behavior of High-Performance Concrete (HPC) under Ammonium Nitrate Solution and Sustained Load. *ACI Mater. J.*, vol. 96, no. 1, pp. 47–51, 1999.
- [32] Scrivener, K. L., John, V. M. & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, pp. 2–26.
- [33] Yang, Z., Weiss, W. J. & Olek, J. (2006). Water Transport in Concrete Damaged by Tensile Loading and Freeze–Thaw Cycling. *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 3, pp. 424–434.
- [34] He, Z., Tang, S. W., Zhao, G. S. & Chen, E. (2016). Comparison of three and one dimensional attacks of freeze-thaw and carbonation for concrete samples. *Construction and Building Materials*, 127, 596-606.
- [35] Kuosa, H., Ferreira, R. M., Holt, E., Leivo, M. & Vesikari, E. (2014). “Effect of coupled deterioration by freeze–thaw, carbonation and chlorides on concrete service life”, *Cement and Concrete Composites*, 47, 32-40
- [36] Rao, M. J., Dong, Y., Yang, H. Q., Li, M.X. & Yu, Z. (2017). Influence of carbonation and freeze-thaw on macro-properties of concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 164, No. 1
- [37] Wittmann, F. H., Zhao, T., Zhang, P. & Jiang, F. (2010). Service life of reinforced concrete structures under combined mechanical and environmental loads. In *2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructures* (pp. 91-98). RILEM Publications SARL.
- [38] Lei, B., Li, W., Li, Z., Wang, G. & Sun, Z. (2018). Effect of cyclic loading deterioration on concrete durability: water absorption, freeze-thaw, and carbonation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), 04018220.
- [39] Antoni, A. (2008). Chloride penetration into fiber reinforced concrete under static and cyclic compressive loading. *Civil Engineering Dimension*, 10(2), 63-69.

- [40] Tang, J., Wang, W., Wang, Z. & Wu, G. (2018). Effect of Curing Age on Chloride Diffusion Coefficient of Recycled Aggregate Concrete Subjected to Compressive Stresses. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 35(2), 326-333.
- [41] Hongming, L., Jin, W., Yongji, S. & Zhe, W. (2014). Effect of external loads on chloride diffusion coefficient of concrete with fly ash and blast furnace slag. *Journal of materials in civil engineering*, 26(9), 04014053.
- [42] Wang, J., Basheer, P. M., Nanukuttan, S. V. & Bai, Y. (2013). Influence of short-term and sustained compressive loading on chloride migration in concrete. In *Cement and Concrete Science Conference*
- [43] Kosior-Kazberuk, M. & Berkowski, P. (2017). Surface scaling resistance of concrete subjected to freeze-thaw cycles and sustained load. *Procedia Engineering*, 172, 513-520.
- [44] Gao, R., Li, Q. & Zhao, S. (2013). Concrete deterioration mechanisms under combined sulfate attack and flexural loading. *Journal of materials in civil engineering*, 25(1), 39-44.
- [45] Yin, L., Yan, C. & Liu, S. (2018). Freeze–Thaw Durability of Strain-Hardening Cement-Based Composites under Combined Flexural Load and Chloride Environment. *Materials*, 11(9), 1721.

Pregled metoda poboljšanja numeričkih modela primjenom rezultata eksperimentalnih istraživanja u dinamičkoj analizi konstrukcija

Suzana Ereiz¹, doc. dr. sc. Ivan Duvnjak²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, suzana.ereiz@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ivan.duvnjak@grad.unizg.hr

Sažetak

Razvojem opreme za eksperimentalna istraživanja omogućuje se vrlo brzo i precizno određivanje dinamičkih parametara konstrukcije kao što su vlastite frekvencije, modalni oblici i koeficijenti prigušenja. Dobivene vrijednosti moguće je koristiti za poboljšanje numeričkih modela s ciljem približavanja rezultata realnom ponašanju konstrukcija. Poznato je da zbog nepoznatih ulaznih parametara kao što su krutosti, masa i rubni uvjeti dobivamo nepouzdana numeričke modele. U radu dan je pregled metoda usporedbe eksperimentalno i numerički dobivenih skupova podataka te metoda koje se najčešće primjenjuju prilikom poboljšanja numeričkih modela. Istaknute su osnovne metode temeljene na vlastitim frekvencijama i modalnim oblicima te njihove izvedenice.

Ključne riječi: numeričko modeliranje, eksperimentalno istraživanje, metode usporedbe i korelacije, poboljšanje numeričkog modela, dinamička analiza konstrukcija

Hybrid model updating based on structural health monitoring in structural dynamics

Abstract

Development of equipment for experimental research enables very fast and accurate determination of dynamic parameters for structures, such as natural frequencies, mode shapes, and damping factors. Thus obtained values can be used to improve numerical models in order to bring the results closer to the real behaviour of structures. It is known that unreliable numerical models are obtained due to unknown input parameters such as stiffness, mass, and boundary conditions. An overview of methods for comparing experimentally and numerically obtained data sets and methods that are most often used in improving numerical models is provided in this paper. Basic methods relying on natural frequencies and modal shapes and their version are highlighted.

Key words: numerical modeling, structural health monitoring, comparison and correlation techniques, model updating, dynamic analysis of structures

1 Uvod

Numerički modeli predstavljaju učinkoviti suvremeni alat koji se koristi za praćenje stanja građevina. Rastom broja novih i napretkom sadašnjih numeričkih metoda, pred numeričkim modelima postavljaju se sve stroži zahtjevi. Sve se više područja, od projektiranja, predviđanja ponašanja do praćenja određenih pojava oslanja na računalne i numeričke modele. Općenito, simulacija je korisna kada stvarni sustav nije ekonomično, praktično ili moguće ispitati.

Budući da se tako velika važnost pridaje numeričkom modeliranju, zahtijeva se da dobiveni rezultati budu pouzdani. Tako je pogreške i nepouzdanosti povezane s pretpostavkama modela potrebno kvantificirati jer su ključne za ocjenu modela i kvantificiranje razine njegove pouzdanosti. Navedeno je dovelo do razvoja metoda poboljšanja numeričkih modela s ciljem njegove kalibracije na temelju stvarnog ponašanja.

U kontekstu projektiranja konstrukcija, numeričko modeliranje obično se izvodi primjenom modela konačnih elemenata (FE). Ovaj tip modela koristi se za analizu unutarnjih sila, naprezanja i pomaka. Kako bi se opravdale nesigurnosti kao što su svojstva materijala, geometrija, rubni uvjeti te opterećenje, uvode se različiti faktori nesigurnosti. Nedostatak podataka o sustavu koji se modelira još je jedna od prepreka u simulaciji primjenom modela konačnih elemenata. Nažalost, uslijed numeričkog modeliranja, dolazi do razlika između mjerenog ponašanja konstrukcije i modela predviđenog ponašanja. Time model ne predstavlja stvarno ponašanje konstrukcije i njegova korisnost za simulaciju opada. Kako bi se navedene razlike minimizirale i korisnost modela povećala, upotrebljavaju se rezultati mjerenja dinamičkog odziva konstrukcije (vlastita frekvencija, oblici titranja, koeficijenti prigušenja) [1-3]. Primjenom metoda poboljšanja modela zajedno s rezultatima dinamičkog ispitivanja moguće je odrediti nepoznate karakteristike sustava poput svojstava materijala, rubnih uvjeta i slično. Osim toga, koriste se i za otkrivanje oštećenja [4-6] koja se mogu prepoznati na temelju pretpostavke da je njihova prisutnost povezana sa smanjenjem krutosti što rezultira promjenom dinamičkih parametara konstrukcije.

Postoji više različitih metoda poboljšanja numeričkih modela, a općenito se mogu podijeliti u dvije skupine: ručne i automatizirane. Ručne metode temelje se na metodi pokušaja i pogreške pri izboru parametara kao što su geometrija, svojstva materijala i rubni uvjeti. Primjenjuju se ako je broj parametara mali, a primjena se smatra uspješnom ako su razlike između analiziranih vrijednosti modela i eksperimenta manje od 5 %. Ako se u obzir uzme veći broj parametara, preporučuju se automatizirane metode. Njihovom primjenom može se postići razlika manja od 1 % između analiziranih vrijednosti modela i eksperimenta [7].

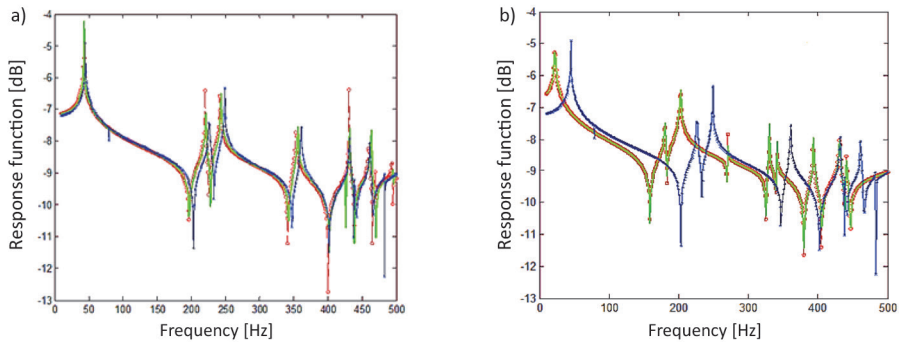
U nastavku, u prvom dijelu dan je prikaz najčešće korištenih metoda usporedbe i korelacije eksperimentalno i numerički dobivenih rezultata. Opisane su usporedbe funkcije frekventijskog odziva, vlastitih frekvencija i vlastitih oblika titranja. U drugom dijelu dan je pregled metoda koje se primjenjuju prilikom izrade poboljšanog numeričkog modela. Opisane su direktne i indirektne metode te njihove izvedenice.

2 Metode usporedbe eksperimentalnih i numeričkih skupova podataka

Prije primjene bilo koje metode (tehnike) poboljšanja numeričkog modela, eksperimentalne i numeričke skupove podataka potrebno je usporediti kako bi se osiguralo postojanje određene razine korelacije. Na taj način utvrđuje se vrijedi li poboljšati predloženi inicijalni numerički model ili je potrebna izrada potpuno novog. Ove metode uključuju usporedbu funkcije frekventijskog odziva (engl. *Frequency Response Function, FRF*), vlastitih frekvencija i vlastitih oblika titranja. Metode temeljene na promjeni vlastitih oblika titranja su modalni faktor skaliranja (engl. *Modal Scale Factor, MSF*), kriterij modalne ortogonalnosti (engl. *Modal Assurance Criterion, MAC*), normalizirani kriterij modalne ortogonalnosti (NMAC), koordinatni kriterij modalne ortogonalnosti (engl. *Coordinate modal assurance criterion, COMAC*), itd. U nastavku, dan je opis najčešćih metoda koje se koriste prilikom usporedbe za svaki od naziva eksperimentalno i numerički dobivenih skupova podataka.

2.1 Usporedba funkcija frekventijskog odziva

Jedna od jednostavnih metoda jest usporedba funkcije frekventijskog odziva kako bi se utvrdila prisutnost bilo kakve povezanosti skupova podataka. Na slici 1.a prikazan je primjer dobre korelacije funkcije frekventijskog odziva gdje se frekvencije međusobno podudaraju. Za slučaj dobrog podudaranja potrebno je poboljšanje numeričkog modela kako bi se korelacija dodatno povećala. Na slici 1.b prikazan je primjer loše usporedbe (korelacije) u kojoj ne dolazi do podudaranja vlastitih frekvencija. U tom slučaju umjesto poboljšanja potrebno je pristupiti konceptualno novom numeričkom modelu [8].



Slika 1. Usporedba funkcija frekvencijskog odziva za a) dobru korelaciju, b) lošu korelaciju [9]

2.2 Usporedba vlastitih frekvencija

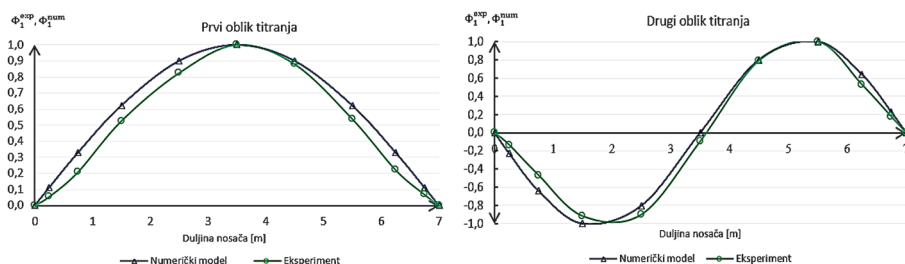
Vrlo je važno usporediti vlastite frekvencije dobivene numeričkom analizom s vrijednostima vlastitih frekvencija dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem konstrukcije. Ako je odstupanje vrijednosti vlastitih frekvencija malo, može se pristupiti poboljšanju numeričkog modela kako bi se odstupanja dodatno umanjila. Radi li se o velikom odstupanju eksperimentalno i numerički dobivenih vrijednosti potrebno je pristupiti konceptualno novom modelu [10]. U tablici 1. prikazan je primjer dobrog podudaranja vrijednosti vlastitih frekvencija dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem (f_n^{exp}) i analizom numeričkog modela (f_n^{num}) te pripadno odstupanje za promatrane vlastite oblike titranja (n).

Tablica 1. Usporedba vrijednosti vlastitih frekvencija

Oblik n	f_n^{exp} [Hz]	f_n^{num} [Hz]	Odstupanje [%]
1	6,94	6,88	0,86
2	17,07	16,72	2,05
3	31,26	30,71	1,76

2.3 Usporedba vlastitih oblika titranja

Jedna od metoda usporedbe vlastitih oblika titranja jest njihovo podudaranje. Primjer jedne takve usporedbe dan je na slici 2. gdje je provedena usporedba eksperimentalno i numerički određenog prvog i drugog vlastitog oblika titranja slobodno oslonjenog nosača.



Slika 2. Grafička metoda usporedbe vlastitih oblika titranja

Ovom se metodom mogu uočiti razlike eksperimentalnih vlastitih oblika titranja i vlastitih oblika titranja numeričkog modela, a za odgovarajući vlastiti oblik titranja te se razlike trebaju približiti nuli. Glavno ograničenje takvih grafičkih metoda je u tome što nisu toliko podržive ako se postupak korelacije želi automatizirati. Za automatiziranu korelaciju vlastitih oblika potrebno je provesti određene kvantitativne (numeričke) mjere korelacije koje se jednostavno mogu provesti različitim računalnim programima ili operacijama. U idućim podpoglavljima opisane su numeričke metode usporedbe vlastitih oblika titranja te je za svaku od njih dan primjer i grafički prikaz rezultata.

2.3.1 Modalni faktor skaliranja (MSF)

Modalni faktor skaliranja, MSF, jest faktor usporedbe dvaju ili više vlastitih oblika titranja koji služe njihovoj normalizaciji kako bi se doveli na istu razinu za mogućnost naknadne obrade. U slučaju složenih vlastitih oblika, MSF je kompleksan broj, a je u slučaju stvarnih vlastitih oblika titranja, MSF realna vrijednost. MSF vrijednost predstavlja nagib idealnog pravca na vlastite oblike titranja prikazane u x-y grafu, gdje je eksperimentalni vlastiti oblik titranja prikazan na jednoj, a numerički dobiveni vlastiti oblik titranja na drugoj osi [11]. Ako pretpostavimo da $\{\Phi^{\text{exp}}\}_i$ i $\{\Phi^{\text{num}}\}_j$ predstavljaju i-ti eksperimentalni i j-ti analitički vlastiti oblik koji želimo usporediti, $\{\Phi^{\text{exp}}\}_j^T$ i $\{\Phi^{\text{num}}\}_i^T$ njihove transponirane oblike, MSF faktor je onda definiran kao:

$$MSF\left(\left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i, \left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j\right) = \frac{\left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i^T \left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j}{\left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j^T \left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j} \quad (1)$$

$$MSF\left(\left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j, \left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i\right) = \frac{\left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j^T \left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i}{\left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i^T \left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i} \quad (2)$$

Ako se radi o dva vlastita oblika titranja koja se podudaraju, $\{\Phi^{\text{exp}}\}_j = \{\Phi^{\text{num}}\}_j$, onda je $\text{MSF}(\{\Phi^{\text{exp}}\}_j, \{\Phi^{\text{num}}\}_j) = \text{MSF}(\{\Phi^{\text{num}}\}_j, \{\Phi^{\text{exp}}\}_j) = 1$. Za dva vlastita oblika za koje vrijedi sljedeće, $\{\Phi^{\text{exp}}\}_j = a\{\Phi^{\text{num}}\}_j$, vrijednost $\text{MSF}(\{\Phi^{\text{exp}}\}_j, \{\Phi^{\text{num}}\}_j) = a$, dok je $\text{MSF}(\{\Phi^{\text{num}}\}_j, \{\Phi^{\text{exp}}\}_j) = 1/a$. Nedostatak MSF je što ne daje nikakve podatke u vezi s rasipanjem rezultata u x, y grafu. Kako bi se taj nedostatak izbjegao, primjenjuje se kriterij modalne ortogonalnosti, tzv., MAC faktor.

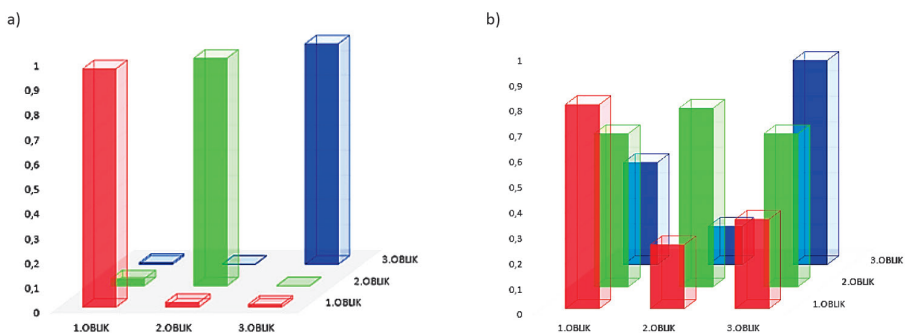
2.3.2 Kriterij modalne ortogonalnosti (MAC)

Kriterij modalne ortogonalnosti, MAC faktor, poznat je kao koeficijent korelacije vlastitih oblika titranja [12]. Njime se utvrđuje u kojoj mjeri pojedini vlastiti oblik titranja pri diskretnim frekvencijama ($\{\Phi^{\text{num}}\}_j$) oko vrha funkcije, oblikom odgovara referentnom vlastitom obliku titranja ($\{\Phi^{\text{exp}}\}_j$) određenom za sam vrh funkcije spektralne gustoće snage. MAC se računa kao normalizirani skalarni produkt (3) dvaju skupova vektora $\{\Phi^{\text{num}}\}_j$ i $\{\Phi^{\text{exp}}\}_j$. Rezultantni skalari raspoređeni su u MAC matricu gdje se može prepoznati oblik funkcije koja upućuje na vezu između $\{\Phi^{\text{num}}\}_j$ i $\{\Phi^{\text{exp}}\}_j$.

$$\text{MAC}\left(\{\Phi^{\text{exp}}\}_j, \{\Phi^{\text{num}}\}_j\right) = \frac{\left| \{\Phi^{\text{exp}}\}_j^T \{\Phi^{\text{num}}\}_j \right|^2}{\left(\{\Phi^{\text{exp}}\}_j^T \{\Phi^{\text{exp}}\}_j \right) \left(\{\Phi^{\text{num}}\}_j^T \{\Phi^{\text{num}}\}_j \right)} \quad (3)$$

MAC faktor može poprimiti vrijednosti između 0 i 1 pri čemu vrijednost jednaka 1 označava savršenu korelaciju vlastitih oblika titranja, a vrijednost jednaka 0 označava nepovezanost između dva vlastita oblika titranja.

Na slici 3.a dan je tipičan grafički prikaz MAC faktora između savršeno koreliranih eksperimentalno i numerički dobivenih vlastitih oblika titranja. Iz prikaza se može uočiti kako su svi dijagonalni elementi jedinstveni, a izvandijagonalni elementi jednaki su nula. Primjer loše korelacije vlastitih oblika titranja prikazan je na slici 3. b gdje niti jedan dijagonalni član nije jedinstven, a izvandijagonalni članovi nisu jednaki 0.



Slika 3. Grafički prikaz kriterija modalne ortogonalnosti za a) dobru korelaciju vlastitih oblika titranja, b) lošu korelaciju vlastitih oblika titranja

Jedno od glavnih ograničenja MAC faktora jest da se njegovom primjenom ne mogu lokalizirati odstupanja između skupova podataka koji se uspoređuju. To ograničenje može se izbjeći kombiniranjem MAC faktora s nekim od drugih metoda usporedbe. Zbog nepostojanja matrice masa i matrice krutosti u formuli prilikom njegova izračuna, MAC faktor nije istinski pokazatelj ortogonalnosti. Korištenjem normaliziranog MAC faktora (NMAC), navedeno ograničenje se može izbjeći [13].

2.3.3 Normalizirani kriterij modalne ortogonalnosti (NMAC)

Normalizirani kriterij modalne ortogonalnosti (NMAC) uzima u obzir ponderiranu matricu, \mathbf{W} , koja se može zamijeniti matricom mase ili matricom krutosti. Svrha upotrebe NMAC faktora je prepoznati da MAC faktor nije osjetljiv na raspodjelu mase ili raspodjelu krutosti, nego samo na raspored senzora koji se prilikom provođenja eksperimenta koriste [14].

$$NMAC\left(\left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i,\left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j\right)=\frac{\left|\left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i^T\mathbf{W}\left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j\right|^2}{\left(\left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i^T\left\{\Phi^{\text{exp}}\right\}_i\right)\left|\mathbf{W}\right|\left(\left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j^T\left\{\Phi^{\text{num}}\right\}_j\right)} \quad (4)$$

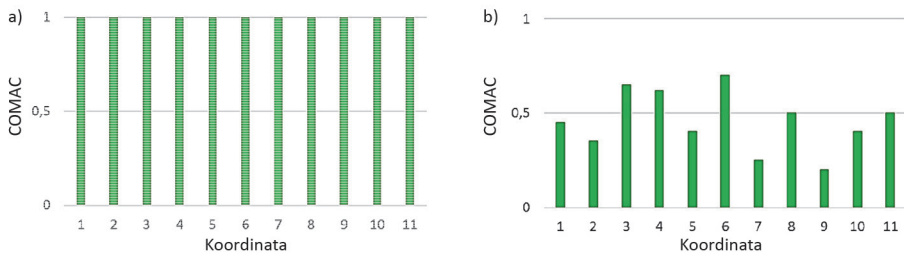
Primjena je NMAC faktora ograničena jer opisuje prostornu raspodjelu korelacije vlastitih oblika titranja. Međutim, ako se primjeni koordinatni kriterij modalne ortogonalnosti (COMAC), tada se može izbjeći to ograničenje.

2.3.4 Koordinatni kriterij modalne ortogonalnosti (COMAC)

Koordinatni kriterij modalne ortogonalnosti (COMAC) nakon pronalaženja broja parova povezanih vlastitih oblika titranja (L) može se odrediti prema sljedećem izrazu:

$$COMAC_k=\frac{\sum_{l=1}^L\left|\left(\Phi^{\text{exp}}\right)_{kl}\left(\Phi^{\text{num}}\right)_{kl}\right|^2}{\sum_{l=1}^L\left(\Phi^{\text{exp}}\right)_{kl}^2\sum_{l=1}^L\left(\Phi^{\text{num}}\right)_{kl}^2} \quad (5)$$

Vrijednost COMAC faktora blizu 1 označava dobru povezanost na određenoj koordinati (npr. k). COMAC-ove plohe koje pokazuju primjer dobre i loše korelacije vlastitih oblika titranja prikazane su na slici 4.



Slika 4. Grafički prikaz koordiniranog kriterija modalne ortogonalnosti za a) dobru korelaciju vlastitih oblika titranja, b) lošu korelaciju vlastitih oblika titranja

2.3.5 Korijen srednjeg kvadrata pogreške (RMSE)

Korijen srednjeg kvadrata pogreške (engl. *Root mean square error, RMSE*) kvadratno je pravilo validacije koje mjeri prosječnu veličinu pogreške, odnosno odstupanja eksperimentalno ($\Phi_{n,q}^{\text{exp}}$) i numerički dobivenih vlastitih oblika ($\Phi_{n,q}^{\text{num}}$) titranja. Predstavlja kvadratni korijen prosjeka kvadratnih razlika između eksperimentalnih i numeričkih rezultata.

$$RMS_n = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{q=1}^k (\Phi_{n,q}^{\text{num}} - \Phi_{n,q}^{\text{exp}})^2}}{\max(\Phi_n)} \quad (6)$$

Između RMSE pogreške i kriterija modalne ortogonalnosti postoji direktna veza pri kojoj za vrijednost koeficijenta modalne ortogonalnosti 1, vrijednost RMSE pogreške iznosi 0. Ta vrijednost RMSE (RMSE = 0) pogreške predstavlja dobru korelaciju vlastitih oblika titranja [15].

2.3.6 Srednja apsolutna pogreška (MAE)

Srednja apsolutna pogreška (engl. *Mean Absolute Error, MAE*) predstavlja prosjek apsolutnih razlika između vlastitih oblika titranja dobivenih numeričkom i eksperimentalnom analizom kada sve pojedinačne razlike u oblicima imaju jednako značenje.

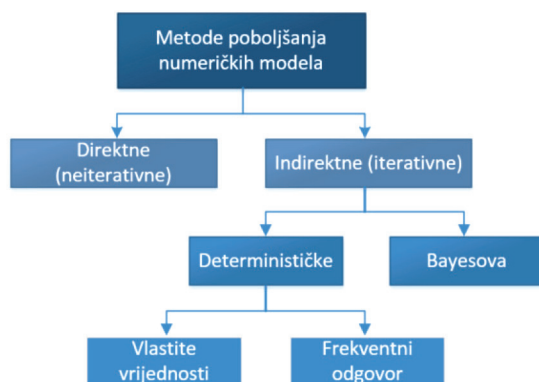
$$MAE_n = \frac{1}{k} \sum_{q=1}^k |\Phi_{n,q}^{\text{num}} - \Phi_{n,q}^{\text{exp}}| \quad (7)$$

Prilikom određivanja točnosti kontinuiranih varijabli, MAE i RMSE dvije su najčešće korištene metode. U oba slučaju pogreške mogu poprimiti vrijednosti između 0 i ∞ ,

pri čemu vrijednosti bliže nuli predstavljaju dobru korelaciju vlastitih oblika titranja. Osim razlike u samom zapisu, proračun RMSE daje veliko značenje velikim pogreškama budući da su pogreške kvadrirane prije nego su uprosječene [8].

3 Metode poboljšanja numeričkih modela

Metode poboljšanja numeričkih modela primjenom rezultata eksperimentalnih ispitivanja mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije (slika 5.).



Slika 5. Osnovna podjela metoda poboljšanja numeričkih modela

Globalnom podjelom metode poboljšanja dijele se na direktne i indirektne metode. Indirektne metode dalje se dijele u dvije kategorije. Prvoj kategoriji pripadaju determinističke metode. Njima se pokušavaju razviti jedinstveni numerički modeli minimiziranjem pogreške između inicijalnog numeričkog modela i podataka dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem. Drugoj kategoriji pripadaju Bayesove metode. One numeričke modele tretiraju kao statističke probleme i cilj im je razviti skup numeričkih modela koji će reprezentirati stvarno ponašanje konstrukcije [16]. Usmjerene su na kvantificiranje nepouzdanosti parametara numeričkog modela koji se podešavaju prilikom njegova poboljšanja [4].

Zadnjih desetljeća prilikom poboljšanja numeričkih modela realnih građevina koriste se determinističke metode temeljene na osjetljivosti. Tomu u prilog ide njihova jednostavnost i računalna učinkovitost u usporedbi s drugim metodama. Većina istraživanja koja su primjenjivala determinističke metode temeljila su se na pretpostavci da su podaci ispitivanja točni i pouzdani. Međutim, pri eksperimentalnom ispitivanju rezultati mjerenja mogu biti izloženi pogreškama i brojnim razinama nesigurnosti (temperatura, šumovi u signalu, mjerna oprema,...). Sve to može utjecati na kvalitetu izmjerenih podataka, a time i na postupak poboljšanja numeričkog

modela što može rezultirati razvojem poboljšanog modela koji neće reprezentirati stvarno ponašanje građevine [17]. Osim toga, postoje brojni parametri numeričkog modela s različitim razinama pouzdanosti koji se podešavaju na osnovi osjetljivosti metode poboljšanja realnih građevina [18, 19]. Ovdje se donosi kratak opis svake od metoda poboljšanja numeričkih modela koje se često primjenjuju u praksi, a temelje se na podjeli prikazanoj na slici 5.

3.1 Direktne (neiterativne) metode

Direktne metode poboljšanja numeričkih modela smatraju se najranije primjenjivanim metodama poboljšanja numeričkih modela, a njihovi su pokretači Baruch [20] i Nagy [21]. Koncept direktnih metoda temelji se na izmjeni globalne matrice krutosti, mase i prigušenja numeričkog modela u jednom koraku i iz toga proizlazi poboljšani numerički model koji točno reproducira eksperimentalne rezultate. Tijekom razvoja tih metoda zabilježene su mnoge uspješne primjene njihovih različitih inačica. To su metode ažuriranja matrica krutosti i mase te koeficijentata prigušenja kojima se izravno minimiziraju razlike između eksperimentalno i analitički određениh vrijednosti. U svim tim metodama nema referenciranja na promjenu fizikalnih parametara numeričkog modela tijekom procesa njegova poboljšanja. Stoga su neizbježne promjene izvornih fizikalnih parametara numeričkog modela koje mogu dovesti do gubitka njegove važnosti [22]. Zbog prethodno navedenih nedostataka direktnih metoda, iterativne metode dobile su na primjeni. Dobar primjer toga su metode temeljene na osjetljivosti uz pomoću kojih se mogu izraditi vrlo pouzdani numerički modeli.

3.2 Indirektne (iterativne) metode

Iterativne metode široko se primjenjuju u području građevinarstva jer imaju veću kontrolu nad postupkom poboljšanja numeričkog modela i njihovom upotrebom mogu se dobiti smisleniji i fizikalno ostvariviji rezultati. Kao što je prije navedeno, iterativne metode mogu se dalje podijeliti u dvije skupine: determinističke metode i Bayesovu metodu. Determinističke metode razvijaju samo jedan numerički model na kraju procesa njegova poboljšanja. Bayesova metoda pretežno se koristi za uključivanje različitih nesigurnosti u proces poboljšanja numeričkog modela na statističkoj osnovi. Najpopularnija deterministička metoda poboljšanja numeričkog modela temelji se na osjetljivosti koja pretpostavlja da su eksperimentalni podaci samo rezultat "poremećaja podataka" izvornog numeričkog modela koji reprezentira idealno ponašanje građevine.

3.2.1 Determinističke metode

Determinističke metode poboljšanja numeričkih modela često se temelje na analizi osjetljivosti i smatraju se najuspješnijim pristupom za primjenu na realnim građevinama. Te metode dobivaju na popularnosti u području građevinarstva u odnosu na druge metode zahvaljujući svojoj jednostavnosti i računalnoj učinkovitosti. Na temelju ciljanih odziva koji se koriste u poboljšanju numeričkih modela, ove metode se mogu dalje podijeliti u dvije skupine:

- metode koje koriste vlastite vrijednosti i vlastite vektore (vlastita frekvencija, vlastiti oblik titranja, koeficijent prigušenja)
- metode koje koriste podatke frekvencijskog odziva.

Metode koje koriste podatke frekvencijskog odziva već su i ranije primjenjivane i istraživane kako bi se riješilo pitanje nedostatka informacija dobivenih iz malog broja vlastitih frekvencija u izmjerenom frekvencijskom području.

3.2.2 Bayesova metoda

Kao što je spomenuto, Bayesova metoda poboljšanja numeričkog modela povezana je s postupkom njegove izrade kojoj se pristupa kao statističkom problemu. Ova metoda koristi Bayesovu teoriju vjerojatnosti koju su razvili Bayes i Price [23] radi poboljšanja prethodnog modela korištenjem dokaza kao što su mjerenja i opažanja. Da bi se to postiglo u dinamici konstrukcija, deterministički modeli ugrađeni su u skup vjerojatnih modela što rezultira predvidljivim (sustavnim) i slučajnim dijelom koji se ne može predvidjeti, a on predstavlja pogrešku nesigurnosti ili predviđanja [16]. Bayesova metoda temelji se na dvjema pretpostavkama: pretpostavci procjene parametara i izbora numeričkog modela. Procjena parametara odnosi se na vjerodostojnost parametara u numeričkom modelu koji se temelji na podacima dobivenim različitim mjerenjima na realnoj konstrukciji i koristi standardni Bayesov teorem. S druge strane, izbor numeričkog modela odnosi se na matematičku hipotezu sposobnosti modela za predviđanjem izmjerenih parametara, odnosno, koliko model vjerodostojno može opisati parametre koji su dobiveni različitim mjerenjima. Ovaj pristup poboljšanja numeričkih modela često može biti kompleksan, dugotrajan i računski ograničen, a time ograničava i primjenjivost na velikim realnim građevinama i mnogim područjima građevinarstva [24].

4 Rasprava o metodama

Utvrđivanje povezanosti, odnosno odstupanja između eksperimentalno i numerički dobivenih skupova podataka ključno je u provedbi poboljšanja modela. Uzimajući u

obzir pregled literature (tablica 2.) je dan sažeti prikaz metoda usporedbe podataka s istaknutim prednostima i nedostacima svake od njih. Njihovom primjenom vrlo lako se mogu utvrditi nedostaci modela i lokalizirati odstupanja od realnog ponašanja konstrukcija. Nakon provedenog postupka usporedbe te utvrđivanja poveznice između skupova podataka, pristupa se poboljšanju modela. U tablici 3. dan je prikaz metoda koje se najčešće primjenjuju u svrhu poboljšanja, s istaknutim prednostima i nedostacima svake od njih.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci metoda usporedbe eksperimentalnih i numeričkih skupova podataka

Skup podataka	Usporedba	PREDNOSTI	NEDOSTACI
Funkcija frekvencijskog odziva	Podudaranje	* Vizualno se lako određuje * Dovoljna količina podataka	*Eksperimentalni podaci ne opisuju u potpunosti stvarno ponašanje konstrukcije * U slučaju prigušenja FRF je vrlo složena funkcija
Vlastita frekvencija	Usporedba vrijednosti	*Eksperimentalno se vrlo lako može izmjeriti *Jednostavna usporedba	*Ne daje podatke o lokalizaciji odstupanja
Vlastiti oblik titranja	Podudaranje	*Jednostavna usporedba *Lokalizacija odstupanja između modela	*Postupak usporedbe složen za automatizaciju *Globalna podudarnost vlastitih oblika
	MSF	*Automatizirani postupak usporedbe	* Ne daje podatke o rasipanju rezultata * Podudarnost vlastitih oblika u diskretnim koordinatama
	MAC	*Daje podatke o rasipanju rezultata	*Nema mogućnost lokalizacija odstupanja *Nije istinski pokazatelj ortogonalnosti
	NMAC	*Uzima u obzir ponderiranu matricu \mathbf{W}	* Opisuje prostornu raspodjelu korelacije
	COMAC	*Identificira koji stupnjevi slobode doprinose niskoj vrijednosti MAC faktora	* Nepouzdanost pri lokalizaciji odstupanja pri usporedbi simetričnih vlastitih oblika titranja.
	RMSE	*Ističe velike pogreške * Izbjegava apsolutnu vrijednost	*Ne daje prosječnu veličinu pogreške
	MAE	*Sve pogreške u modelu imaju jednako značenje *Daje prosječnu veličinu pogreške	*Uzima u obzir apsolutnu vrijednost

Tablica 3. Prednosti i nedostaci metoda poboljšanja numeričkih modela

	INAČICE	PREDNOSTI	NEDOSTACI
Direktne	-	*Ne zahtijeva iteracije *Reproduciranje eksperimentalnih rezultata	*Neizbježna promjena izvornih fizikalnih parametara *Potrebna kvalitetna mjerenja i precizna modalna analiza
Indirektne	DETERMINISTIČKE	*Vrlo pouzdani numerički modeli *Veća kontrola nad poboljšanjem numeričkog modela *Dobivanje smislenijih i fizikalno ostvarivijih rezultata	*Zahtijeva provođenje iterativnog postupka
	BAYESOVA	*Vjerodostojnost parametara numeričkog modela *uključivanje različitih nesigurnosti u proces poboljšanja	*Kompleksnost *Dugotrajnost *Računalna učinkovitost

5 Zaključak

Razvoj računalnih softvera i metoda numeričke analize imaju veliko značenje u području praćenja stanja građevina. Napretkom se tako postavljaju sve stroži kriteriji i zahtjevi numeričkim modelima koji se koriste u različite svrhe od projektiranja, predviđanja ponašanja pa sve do praćenja određenih pojava. Postavljanjem strožih zahtjeva razvila se potreba za uspostavom metoda poboljšanja numeričkih modela. Općenito govoreći, cilj poboljšanja je razvoj i prilagodba modela prema stvarnoj izvedbi konstrukcije. Tako se omogućuje učinkovito korištenje modela u svrhu praćenja, otkrivanja oštećenja te procjene stanja građevine u pogledu njene mehaničke otpornosti i stabilnosti. Kako bi se utvrdilo posjeduje li model kapacitet za njegovo poboljšanje ili je potrebno pristupiti konceptualno novom rješenju, rezultati numeričke analize uspoređuju se s eksperimentalno dobivenim. U ovom radu dan je pregled metoda usporedbe i korelacije numerički i eksperimentalno dobivenih parametara. Opisane metode uzimaju u obzir funkciju frekvencijskog odziva, vlastite frekvencije i vlastite oblike titranja. Usporedba funkcije frekvencijskog odziva i vlastitih oblika titranja uglavnom se temelje na podudaranju eksperimentalno i numerički dobivenih odziva. Osim podudaranja, usporedba vlastitih oblika titranja zasniva se i na metodama temeljenim na njihovoj promjeni – MSF, MAC, NMAC, COMAC. Usporedba vlastitih frekvencija temelji se na odstupanju numerički od eksperimentalno dobivene vrijednosti. Osim metoda usporedbe, dan je i pregled metoda koje se najčešće primjenjuju u svrhu poboljšanja modela. Istaknute su direktne i indirektne metode te njihove inačice. Primjenom direktnih metoda razvi-

ja se numerički model koji točno reproducira eksperimentalne rezultate. S druge strane, iterativnim metodama dobivaju se smisleniji i fizikalno ostvariviji rezultati. Prvom inačicom iterativnih metoda, determinističkim metodama, na kraju procesa poboljšanja razvija se jedan model. Druga inačica, Bayesova metoda, koristi se za uključivanje različitih nesigurnosti modela i temelji se na statističkoj osnovi. Zbog svoje jednostavnosti i računalne učinkovitosti, najuspješniju primjenu na realnim građevinama postigle su determinističke metode temeljene na osjetljivosti te sve više dobivaju na popularnosti u području građevinarstva. Odabir metode poboljšanja ovisi o složenosti problema, uzimajući u obzir prednosti i nedostatke metoda te o potrebama istraživača.

Literatura

- [1] A. Cabboi, C. Gentile, i A. Saisi, "From continuous vibration monitoring to FEM-based damage assessment: Application on a stone-masonry tower", *Construction and Building Materials*, sv. 156, str. 252–265, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.160.
- [2] A. S. Araujo, P. B. Lourenco, D. V. Oliveira, i J. Leite, "Seismic Assessment of St James Church by Means of Pushover Analysis – Before and After the New Zealand Earthquake", *The Open Civil Engineering Journal*, sv. 6, izd. 1, str. 160–172, 2012, doi: 10.2174/1874149501206010160.
- [3] S. Lagomarsino, "On the vulnerability assessment of monumental buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, sv. 4, izd. 4, str. 445–463, 2006, doi: 10.1007/s10518-006-9025-y.
- [4] E. Simoen, G. De Roeck, i G. Lombaert, "Dealing with uncertainty in model updating for damage assessment: A review", *Mechanical Systems and Signal Processing*, sv. 56, str. 123–149, 2015, doi: 10.1016/j.ymsp.2014.11.001.
- [5] A. Cancelli, S. Laflamme, A. Alipour, S. Sritharan, i F. Ubertini, "Vibration-based damage localization and quantification in a pretensioned concrete girder using stochastic subspace identification and particle swarm model updating", *Structural Health Monitoring*, sv. 19, izd. 2, str. 587–605, 2020, doi: 10.1177/1475921718820015.
- [6] H. Seon Park, J. H. Kim, i B. K. Oh, "Model updating method for damage detection of building structures under ambient excitation using modal participation ratio", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, sv. 133, str. 251–261, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.10.023.
- [7] A. C. Altunişik, E. Kalkan, F. Y. Okur, O. Ş. Karahasan, i 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*, sv. 34, izd. 1, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001344.

- [8] Ajaya Kumar Gupta, "Response Spectrum Method in seismic analysis and design of structures", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, sv. 26, izd. 3, str. 369, 1993, doi: 10.5459/bnzsee.26.3.369.
- [9] D. Jiang, P. Zhang, Q. Fei, i S. Wu, "1330. Comparative study of model updating methods using frequency response function data", *Journal of Vibroengineering*, sv. 16, izd. 5, str. 2305–2318, 2014.
- [10] K. He i W. D. Zhu, "Structural damage detection using changes in natural frequencies: Theory and applications", *Journal of Physics: Conference Series*, sv. 305, izd. 1, 2011, doi: 10.1088/1742-6596/305/1/012054.
- [11] R. J. Allemang i D. L. Brown, "Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis.", *Proceedings of the International Modal Analysis Conference & Exhibit*, str. 110–116, 1982.
- [12] M. Pastor, M. Binda, i T. Harčarik, "Modal assurance criterion", *Procedia Engineering*, sv. 48, str. 543–548, 2012, doi: 10.1016/j.proengl.2012.09.551.
- [13] T. K. Kundra i B. c. Nakra, "Optimum dynamic design using modal testing and structural dynamic modification", u *IUTAM - IITD international winter school of optimum dynamic design*, 1997.
- [14] R. J. Allemang, "The modal assurance criterion - Twenty years of use and abuse", *Sound and Vibration*, sv. 37, izd. 8, str. 14–21, 2003.
- [15] "Root mean square error criterion using operational deflection shape curvature for structural damage detection | JVE Journals". <https://www.jvejournals.com/article/16450> (pristupljeno tra. 09, 2020).
- [16] B. Goller i G. I. Schuëller, "Investigation of model uncertainties in Bayesian structural model updating", *Journal of Sound and Vibration*, sv. 330, izd. 25, str. 6122–6136, 2011, doi: 10.1016/j.jsv.2011.07.036.
- [17] J. E. Mottershead i M. I. Friswell, "Model Updating in structural dynamics.pdf", *Journal of Sound and Vibration*, sv. 167(2), str. 347–375, 1993.
- [18] B. Briseghella i ostali, "Dynamic Assessment of a Curved Cable-Stayed Bridge Based on Multi-Year Monitoring", *IABSE Congress Report*, sv. 18, izd. 27, str. 406–413, 2013, doi: 10.2749/222137912805110655.
- [19] N. Ibán i ostali, "Finite element model updating of a lively footbridge", *6th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2015*, 2015.
- [20] M. Baruch, "Optimization procedure to correct stiffness and flexibility matrices using vibration tests", *AIAA Journal*, sv. 16, izd. 11, str. 1208–1210, 1978, doi: 10.2514/3.61032.
- [21] A. Berman i E. J. Nagy, "Improvement of a large analytical model using test data", *AIAA Journal*, sv. 21, izd. 8, str. 1168–1173, 1983, doi: 10.2514/3.60140.

- [22] M. Girardi, C. Padovani, D. Pellegrini, M. Porcelli, i L. Robol, "Finite element model updating for structural applications", sv. 2014, str. 2016–2018, 2018.
- [23] M. Bayes i M. Price, "An essay towards solving a problem in the doctrine of chances, by the late rev. mr. bayes, frs communicated by mr. price., in a letter to john canton, amfrs.", *Philosophical Transactions*, sv. 1683–1775, str. 370–418, 1763.
- [24] H. B. Başağa, T. Türker, i A. Bayraktar, "A model updating approach based on design points for unknown structural parameters", *Applied Mathematical Modelling*, sv. 35, izd. 12, str. 5872–5883, 2011, doi: 10.1016/j.apm.2011.05.041.

Developing high-performance concrete using locally available materials

Kiran Ram¹, Asst. Prof. Marijana Serdar², Diana Londono-Zuluaga³, PhD, Prof. Karen L Scrivener⁴

¹University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, kiran.ram@grad.unizg.hr

²University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, marijana.serdar@grad.unizg.hr

³Laboratory of Construction Materials, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, diana.londonozuluaga@epfl.ch

⁴Laboratory of Construction Materials, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, karen.scrivener@epfl.ch

Abstract

In recent decades, the demands on concrete have increased beyond mere fulfilment of compressive strength requirements. Today, there is a demand for concrete with high resistance to aggressive environments so as to ensure the planned service life of structures. To provide for this high resistance, high-performance concretes are usually based on packing density achieved with a high proportion of fines provided by various supplementary cementitious materials. Silica fume and fly ash are some of the commonly used materials, while calcined clay and limestone are the emerging ones. The study presented in this paper aims to investigate the potential of different materials collected locally in Croatia for use as alternative supplementary cementitious materials in high-performance concrete. Initial experiments focused on the chloride migration resistance of four different combinations of mixed binders and a reference mix. Based on the results presented, the next phase will be to optimize high-performance concrete with calcined clays and fly ash.

Key words: high-performance concrete, low CO₂ cementitious materials, calcined clays, non-steady state chloride diffusion, surface electrical resistivity

Razvoj betona visokih uporabnih svojstava na bazi lokalno dostupnih materijala

Sažetak

Posljednjih desetljeća zahtjevi za beton povećali su se izvan ispunjenja tlačne čvrstoće. Danas postoji potražnja za betonom s visokom otpornošću u agresivnom okolišu kako bi se osigurao projektirani uporabni vijek građevina. Da bi se osigurala ova velika otpornost, betoni visokih uporabnih svojstava obično se temelje na gustoći pakiranja koja se postiže velikim udjelom sitnih čestica, što osiguravaju razni mineralni dodatci cementu. Silicijska prašina i leteći pepeo neki su od najčešće korištenih materijala, dok su kalcinirana glina i vapnenac materijali koji se sve češće koriste. Cilj ovog istraživanja je odrediti potencijal različitih lokalno dostupnih materijala kao alternativnih mineralnih dodataka u betonu visokih uporabnih svojstava. Početna istraživanja usredotočena su na otpornost na prodor klorida četiri različite kombinacije miješanih veziva i referentne mješavine. Na temelju prikazanih rezultata, sljedeća faza bit će optimizacija betona visokih uporabnih svojstava s kalciniranom glinom i letećim pepelom.

Ključne riječi: betoni visokih uporabnih svojstava, cementni materijali s manjom razinom CO₂ emisije, kalcinirane gline, difuzija klorida, električna otpornost

1 Introduction

In the past few decades, a lot of special type of concretes have been produced to meet the unique requirements of construction industry. High-performance concrete (HPC) is one of the main variants among these, and the application-level of HPC is still growing and entering into broader application areas. A high-performance concrete always gives an optimized concrete with essential performance characteristics using given materials exposed to given condition, all provided with optimized cost and service life [1]. Development of HPC in the 1970s was mainly focused on reaching maximum compressive strength in the range of 80-120 MPa [1]. It is only later that the term HPC started to include high performance of fresh state properties and/or durability properties.

Proper material selection must be made for producing HPC of low porosity and fine pore structure. From the perspective of materials, alternative binders and chemical admixtures could be a proper choice for acquiring concrete of such required properties. In the current generation, supplementary cementitious materials (SCMs) are used as sustainable and economical alternatives for clinker at larger scale [2]. Silica fume (SF) and fly ash (FA) are two major SCMs that are used in HPC, providing reduced porosity in mortar matrix and improving the interfacial transition zone (ITZ) with aggregates. Additionally, secondary hydration products from pozzolanic materials also give significant contribution to the prolonged service life of concrete [3]. Nowadays, the availability of all these traditional SCMs is limited. Therefore, concrete industry needs alternative raw materials for the long-run. This issue can be overcome by the use of natural clay as SCM – which becomes reactive when calcined at temperatures between 600-800 °C. In normal concrete, the usual replacement level of cement with calcined clay is around 30%, when the cost of calcination usually does not make this an economically viable option. Additional clinker substitution can be achieved with around 15% of limestone as ternary binder coupled with calcined clay, in what is known as limestone calcined clay cement -LC³. The reasoning for such combination lies in the reaction between the aluminate component of the calcined clay with calcium carbonate (limestone) and calcium hydroxide to produce space filling carboaluminate hydrates [4]. Currently, these types of concrete have been widely used in countries like India, Brazil, Cuba, etc.

This paper aims to present preliminary data from initial tests on five mixes using locally available SCMs including fly ash, clays, and silica fume. The overall action plan is explained in Figure 1, with steps already taken and those planned in the forthcoming period. Based on the presented results, combinations of SCMs will be optimized, with the aim of developing a high-performance concrete that can be used in extreme environmental conditions.

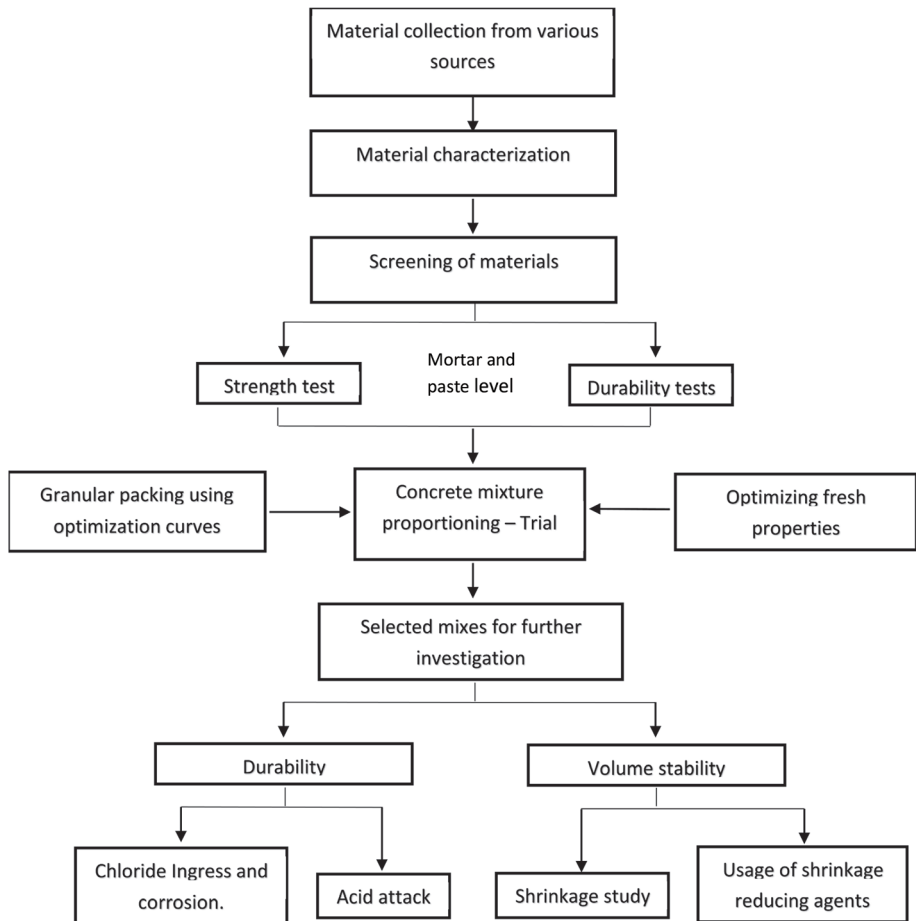


Figure 1. Proposed methodology for producing high-performance concrete using locally available alternative binders

2 General principles in HPC design

2.1 Mix proportioning

Generally, production of high-performance concrete is more complicated compared to conventional concrete. In most HPC designs, it is assumed that best engineering properties are gained when constituents are densely packed. Typical concretes are made with particles covering the size range from 10^{-3} m to 10^{-9} m. In HPC, all these solid particles should be arranged with minimum voids to get the composition of maximum density. It is the grading or packing of the whole range of particles, from coarse aggregate to fine aggregate, to cement grains, and to fine and ultra-fine ce-

mentitious materials, that determines the overall performance of a concrete mix [5]. It is assumed in the packing theory that the addition of finer particles to concrete matrix is beneficial to filling up the voids and reducing the space for water [6-8]. The particle packing density (ϕ) is defined as the solid volume of particles in a unit volume. Several methods are available for determining the particle packing density of composite mixtures. Particle packing of a mixture was initially achieved by means of optimization curves, Figure 2. In this method, a group of particles with different particle size distribution are combined in such a way that the total particle size distribution of the mixture matches an optimum curve.

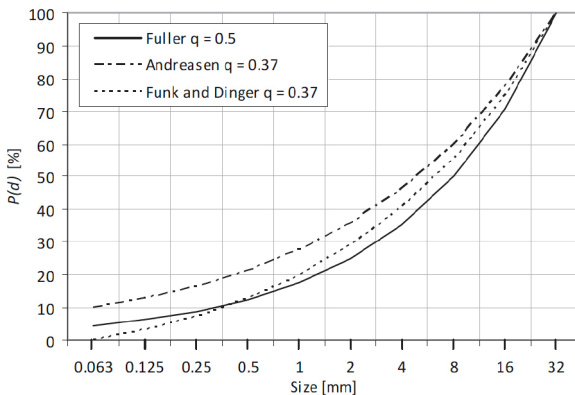


Figure 2. Ideal packing curve according to various studies [9-11].

Another method for determining the particle packing density is via particle packing models, Table 1. Several researchers reported that HPCs designed by the particle packing method exhibited excellent resistance against chemical attacks as well as a prolonged service life. For instance, Fennis et al. produced concrete using the particle packing method with fly ash, quartz powder, and bottom ash. The results showed that it is possible to design ecological concrete in which 50% of the cement is saved by using the particle packing technology in concrete mixture optimization [12].

Table 1. Various particle packing models used for particle packing density determination

The Furnas model	<ul style="list-style-type: none"> Valid for two groups of mono-sized particles Most of the current models based on this model 	[13]
The Toufar and modified Toufar model	<ul style="list-style-type: none"> Determination of packing density of binary mixes with diameter ratio between 0.22 and 1.0. Assumed that each of the fine particles is placed between precisely four coarse particles 	[14]
The Dewar model	<ul style="list-style-type: none"> A smaller particle will fill the voids between larger particles Entire particle structure influenced by particle interference. 	[15]
Linear Packing Density Model	<ul style="list-style-type: none"> Furnas model improved by extending the two components to multi-components with geometrical interaction between the particles. 	[7] [16]
Compressible Packing Model	<ul style="list-style-type: none"> Introduced virtual compactness factor, and is related to compaction energy. Larrard et al. included this factor in binary granular mixes and evaluated particle packing density. 	[7]
The Schwanda model	<ul style="list-style-type: none"> The model calculates the maximum void ratio, which corresponds to the minimum voids content, and then determines the maximum packing density. 	[17]

2.2 Workability

HPC contains a significant number of finer particles like fly ash and silica fume to minimize the void content in the mixture. Generally, workability of a concrete mix is dependant on the number of fine particles included in the mix. Studies from various researchers have proven that a very dense composition with too many fine particles produces a low-workability concrete [18]. To maintain the workability at a low water/binder ratio, the use of high-water reducer type superplasticizer (SP) is highly recommended in HPC. Nithya et al. report that a significantly higher dosage of SP is required for limestone-calcined clay cement compared to fly ash and ordinary Portland cement system. They also report that the use of the Poly Carboxylic Ether (PCE) based SP could provide more workability in LC³ based concrete compared to ordinary concrete. The higher SP dosage in clay-containing concrete is attributed to the exchange of cations in the clay with the organic materials present in the admixture to neutralize electrical charges on the clay particle surface [19], causing lower dispersion of SP in the mixture. It is evident that the selection of SP type and dosage will play a key role in their performance in HPC design [20]. Therefore, for an optimized HPC, the compatibility of different superplasticizers with alternative binders needs to be studied.

2.3 Performance in harsh environments

Chloride diffusion is one of main factors that influence concrete durability and contribute to the reduction of service life of concrete structures. Better resistance to

chloride diffusion of HPC compared to classical concrete can be expected due to high density and tightly packed structure. Tammi et al. [21] report that high-performance concrete with GGBFS exhibits chloride diffusivity below the chloride threshold of 0.40% at a depth of 10 mm, while standard concrete reveals higher than the threshold diffusivity at the same depth. Concrete with palm fuel ash, rice husk ash, and fly ash, significantly improves resistance against chloride attack in mortar by enhancement in nucleation sites for C-S-H precipitation, reducing the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and improving the permeability of mortar [22]. In the LC^3 system, the pore refinement would be happening at an early age, and is dependent on the original kaolinite content in clay. The rapid pore refinement in LC^3 system is advantageous to limiting chloride ingress [23]. The chloride diffusion coefficient obtained with an accelerated method shows that the diffusion coefficient for $\text{LC}^3\text{-50}$ is ten times lower than that of the plain Portland cement [24]

Concretes exposed to environmental conditions such as those used in sewage pipes, oil refineries, and food processing factories, demonstrate significant interaction with chemical acids, including sulphuric acid, and hydrochloric acid. Standard concrete, exposed to these highly corrosive acids, might suffer considerable damage. It is, therefore, clear that HPC could be used to ensure higher resistance to acid attack. According to literature, concrete with a combination of 10% silica fume and 60% fly ash as an OPC replacement produced maximum protection against acid attack, which is represented in the study by sulphuric and hydrochloric acid [25]. Said-Mansour et al. reported that mortar with 10%, 20% and 30% calcined kaolin showed better resistance against 1% hydrochloride acid and 2.5% sulphuric acid. The weight losses are around 30% in sulphuric acid and 35% in hydrochloric acid, whereas OPC exhibited 40% weight loss in sulphuric acid [26].

3 Experimental Program

3.1 Materials

Mortar with Portland cement CEM I 42.5R was used as control mix in this research. Siliceous fly ash from Tuzla, Bosnia and Herzegovina, and natural clays from different sources (Našice and Maruševec, Croatia), were used after calcination (three-minute grinding in disc mill, followed by calcination at 800°C for 1 hour) with 30% replacement level of CEM I. Five combinations were used in this study, with one reference and four alternative composite mixes. In composite mixes, a suitable amount of gypsum was added to ensure the ideal sequence of chemical reactions (calcium silicate reaction followed by aluminate reaction). Chemical composition and physical properties of each material are given in Table 2, while mix design details are given in Table 3. The 0-4 mm fine aggregate was used for mortar and the water binder ratio

was taken to be 0.50. All mortar specimens were mixed in Hobart mixer as per the EN 196-1 [27]. After casting, specimens were demoulded after 24 hours and stored in a humidity chamber (RH maintained at 95%) until testing.

Table 2. Chemical and physical properties of each material

Compound	CEM I	Silica fume	Fly ash	Calcined clay - A (CCA)	Calcined Clay - B (CCB)
SiO ₂	19.32	92.02	53.28	63.70	62.41
Al ₂ O ₃	4.86	1.68	19.11	19.53	21.35
Fe ₂ O ₃	2.94	0.45	9.05	6.80	7.26
CaO	64.04	3.06	11.52	2.57	2.17
MgO	1.83	0.77	2.78	2.34	1.78
SO ₃	2.75	0.27	1.48	0.12	0.07
Kaolinite	--	--	--	13.4	17.6
Density [g/cm ³]	2900	2200	2400	2200	2500
Specific surface area [m ² /g]	19834	137135	11694	3193	2984

Table 3. Mix details

Mix	CEM I, [kg/m ³]	Silica fume [kg/m ³]	Fly ash [kg/m ³]	Calcined clay – A, [kg/m ³]	Calcined clay – B, [kg/m ³]	Water [kg/m ³]	Fine aggregate [kg/m ³]
CEM I	450	--	--	--	--	225	1350
SF10	405	45	--	--	--	225	1350
FA30	315	--	135	--	--	225	1350
CCA30	315	--	--	135	--	225	1350
CCB30	315	--	--	--	135	225	1350

3.2 Methods

Three mortar prism specimens measuring 160 mm × 40 mm × 40 mm were prepared for each mix for the evaluation of compressive strength after 2, 7, 28, and 56 days according to EN 196-1. Electrical resistivity of each specimen was measured by the Wenner 4-probe resistivity meter on the side of saturated cylinder specimen measuring 100 mm in diameter and 200 mm in height [28]. Three measurements were taken at four different locations on the curved surface of specimen at two different specimens of each mix. All measurements were taken on fully saturated specimens so that resistivity values are not affected by drying. The resistance to chloride ingress was assessed after 7, 28, and 56 days of curing on three cylinder specimens measuring 50 mm in thickness using NT BUILD 492 [29] test method. This test is used to evaluate the non-steady state chloride migration coefficient of cementitious materials. In this method, an external electrical potential was applied axially across the specimen throughout the test. After the end of the test, the specimen was split axially and silver nitrate solution was sprayed to the freshly split sec-

tion. Later, the chloride penetration depth was visible as the white silver chloride penetration, and the depth was measured using digital Vernier callipers. Chloride migration coefficient was calculated based on this penetration depth, applied voltage, and test duration.

4 Test results and discussions

4.1 Compressive strength

Fresh properties of all mixes are given in Table 4. All these mixes showed good workability, and their flow table diameters ranged from 146 to 166.5 mm. The compressive strength evolution of five mixes in 56 days is shown in Figure 3, while relative strength of each mix with respect to CEM I is presented in Figure 4. Compared to the control specimen, the mixes with calcined clays, CCA30 and CCB30, achieved 70% and 87% strength, respectively, within 28 days. Such results indicate that calcined clays are highly reactive in early ages. Regardless of the lower binder content in CCB30 and FA30, both mixes showed good compressive strength compared to CEM I after 28 days. Also, CCB30 revealed slightly higher strength compared to SF10 after 56 days. Unexpectedly, the compressive strength of silica fume mix showed less strength than the control mix, as was revealed by micro structural analysis. Though there was no significant addition in compressive strength at early ages, FA30 specimens showed better strength-gain behaviour in extended curing by prolonged pozzolanic reaction [30]. CCA30 gave average strength compared to CEM I, and it could be recommended for the use of ordinary types of concrete.

Table 4. Fresh properties of five mixes

Mixes	Flow diameter, mm	Temperature [°C]	Density [kg/m ³]	Air content [%]
CEM I	160	18.7	2362	4.1
SF10	157	19.7	2336	2.2
FA30	146	19.6	2270	2.7
CCA30	166.5	19.6	2310	2.5
CCB30	165	19.5	2325	2.4

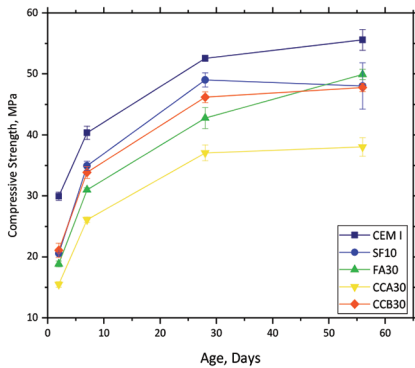


Figure 3. Compressive strength evolution of all mixes

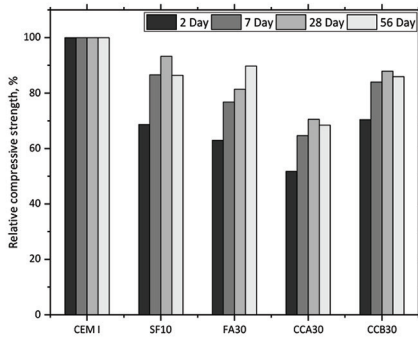


Figure 4. Strength of all mixes relative to CEM I mix

4.2 Surface Electrical Resistivity

The surface resistivity is employed as a quick indication of the resistivity of bulk concrete and is often used as a tool for determination of concrete quality and optimization of concrete mixes [31]. In this study, electrical resistivity of each mix was measured at 7, 28, and 56 days of curing, Figure 5. Results showed that the addition of silica fume gave enhanced resistance for the mixture, which is potentially due to denser microstructure of specimens, as caused by filler effect and additional pozzolanic reaction [32]. All other mixes showed better surface resistance values compared to the reference mix.

4.3 Resistance to chloride penetration

The non-steady state diffusion coefficient was measured at each mix according to NT Build- 492 at 7, 28, and 56 days. In the cases of calcined clay mixes, Figure 4 proves that migration coefficient values are comparable to CEM I values after 28

days and 56 days. As seen in compressive strength data, calcined clays specimens attained their maximum value within 28 days, whereas FA30 and SF10 mixes gained their maximum during extended curing. This is due to higher reactivity of calcined clays, and accelerated microstructure development at an early age of curing [33]. It is evident from Figure 6 that the mixes with silica fume and fly ash show reduced chloride ingress after each testing age. Though all mixes showed high migration coefficient values after 7 days, chloride ingress was reduced by 60% after 28 days, and by 70% at 56 days in SF10 mix, and by 64% and 66% in FA30 mix.

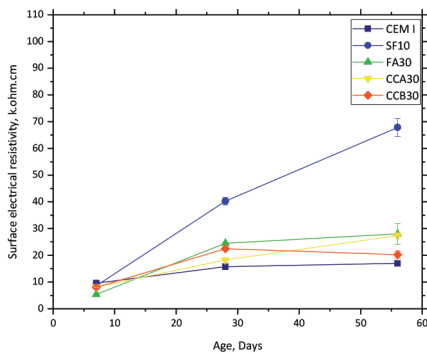


Figure 5. Evolution of electrical surface resistivity of each mix

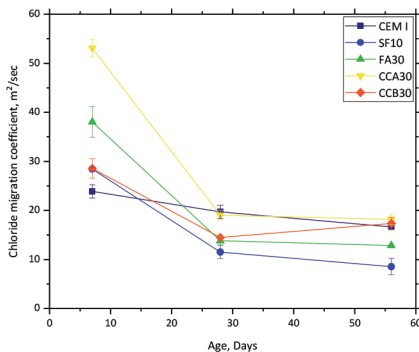


Figure 6. Evolution of chloride migration coefficient by NT BUILD 492 method

5 Conclusion

It is evident from literature that alternative SCMs such as fly ash and natural clays could be of interest for making high-performance concrete. Besides potential benefits in particle packing density, filling effect, and pozzolanic activity, they could prove advantageous to sustainable and economic aspects of HPC production.

As to availability of materials, calcined clays showed potential as alternative cementitious material in high-performance concrete. Mortar made with two different calcined clays with 30% replacement of cement showed results comparable to CEM I mortar in strength development and chloride migration coefficient after 28 days. The reactivity of calcined clays at early ages was higher compared to fly ash and silica fume. Other mixes showed enhanced properties in extended curing. The next phase of the project will involve mix optimisation for the high-performance concrete with calcined clays and fly ash.

Acknowledgements

The presented research is a part of a scientific project “Advanced low CO₂ cementitious materials” – ACT, that is financed within the Croatian-Swiss Research Program of the Croatian Science Foundation and the Swiss National Science Foundation with funds obtained from the Swiss-Croatian Cooperation Program.

References

- [1] Neville, A., Aitcin, P. High performance concrete — An overview. *Materials and Structures*, Vol. 31, 111–117, 1998, <https://doi.org/10.1007/BF02486473>
- [2] Serdar, M., Bjegović, D., Štirmer, N., Pečur, I. B., Research challenges for broader application of alternative binders in concrete, *Gradjevinar*, vol. 71, no. 10, pp. 877–888, 2019, doi: 10.14256/JCE.2729.2019.
- [3] Chang, P. K., An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 4, pp. 623–629, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.10.010.
- [4] Scrivener, K. L., Options for the future of cement, *Indian Concr. J*, vol. 88, no. 7, pp. 11–21, 2014.
- [5] Wong, H. H. C., Kwan, A. K. H., Packing density : a key concept for mix design of high performance concrete, *Mater. Sci. Technol. Eng. Conf. Hong Kong*, pp. 1–15, 2005.
- [6] Kwan, A. K. H., Wong, H. H. C., Packing density of cementitious materials: part 2—packing flow of OPC+ PFA+ CSF, *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 4, p. 773, 2008.
- [7] De Larrard, F., *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. CRC Press, 1999.
- [8] Kronlöf, A., *Filler effect of inert mineral powder in concrete*, 1997.
- [9] Fuller, W. B., Thompson, S. E., *The laws of proportioning concrete*, 1907.

- [10] Talbot, A. N., Brown, H. A., Richart, F. E., The strength of concrete: its relation to the cement aggregates water, no. 137–138. University of Illinois, 1923.
- [11] Reasen, A. H. M., Ersen, J., Relation between grain size interstitial space in products of unconsolidated granules, *Kolloid-Zeitschrift*, vol. 50, no. 3, pp. 217–228, 1930.
- [12] Fennis, S., Walraven, J., Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design, no. January 2012, 2016.
- [13] Furnas, C. C., Grading Aggregates, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 23, no. 9, pp. 1052–1058, 1931, doi: 10.1021/ie50261a017.
- [14] Toufar, W., BEITRAG ZUR OPTIMIERUNG DER PACKUNGSDICHTE POLYDISPERSER KOERNIGER SYSTEME., 1976.
- [15] Dewar, J., Computer modelling of concrete mixtures. CRC Press, 1999.
- [16] Stovall, T., De Larrard, F., Buil, M., Linear packing density model of grain mixtures, *Powder Technol.*, vol. 48, no. 1, pp. 1–12, 1986.
- [17] Schw a, F., Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für den Spannbetonbau, *Zement und Bet.*, vol. 37, no. 8–17, p. 13, 1966.
- [18] Yen, T., Tang, C., Chang, C., Chen, K., Flow behaviour of high strength high-performance concrete, vol. 21, no. October 1998, 1999.
- [19] Nair, N., Mohammed Haneefa, K., Santhanam, M., Gettu, R., A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems, *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, p. 119326, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119326.
- [20] Li, P. P., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H., Effect of PCE-type superplasticizer on early-age behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC), vol. 153, pp. 740–750, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.145.
- [21] Tamimi, A. K., Abdalla, J. A., Sakka, Z. I., Prediction of long term chloride diffusion of concrete in harsh environment, *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 829–836, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.001.
- [22] Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Sirivivatnanon, V., Resistance to chloride penetration of blended Portl cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash fly ash, *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 932–938, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.001.
- [23] Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., Maity, S., Calcined clay limestone cements (LC3), *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, no. March 2017, pp. 49–56, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017.
- [24] Antoni, M., Investigation of cement substitution by blends of calcined clays limestone THÈSE N O 6001 (2013) ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, vol. 6001, 2013.

- [25] Tamimi, A. K., High-performance concrete mix for an optimum protection in acidic conditions, *Mater. Struct. Constr.*, vol. 30, no. 3, pp. 188–191, 1997, doi: 10.1007/bf02486392.
- [26] Said-Mansour, M., Kadri, E. H., Kenai, S., Ghrici, M., Bennaceur, R., Influence of calcined kaolin on mortar properties, *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2275–2282, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.017.
- [27] 196-10:2016, B. E., BSI Standards Publication *Methods of testing cement*, no. Vi, 2016.
- [28] FDOT, F. M., FM 5-578: Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability, Florida Dep. Transp., 2004.
- [29] NT Build 492, Concrete, mortar cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, *Measurement*, pp. 1–8, 1999.
- [30] Berodier, E., Scrivener, K., Evolution of pore structure in blended systems, *Cem. Concr. Res.*, vol. 73, pp. 25–35, 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.02.025.
- [31] Ghosh, P., Tran, Q., Influence of parameters on surface resistivity of concrete, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 134–145, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.06.003.
- [32] Onuaguluchi, O., Panesar, D. K., Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber silica fume, *J. Clean. Prod.*, vol. 82, pp. 125–131, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.068.
- [33] Dhapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., Pillai, R. G., Mechanical properties durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3), *Cem. Concr. Res.*, vol. 107, no. March, pp. 136–151, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.02.005.

Application of thermogravimetric analysis for characterization of clay as supplementary cementitious material

Matea Flegar¹, Asst. Prof. Marijana Serdar², Diana Londono-Zuluaga³, PhD, Prof. Karen Scrivener⁴

¹University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, matea.flegar@grad.unizg.hr

²University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, marijana.serdar@grad.unizg.hr

³Laboratory of Construction Materials, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, diana.londonozuluaga@epfl.ch

⁴Laboratory of Construction Materials, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, karen.scrivener@epfl.ch

Abstract

High-volume cement replacements can potentially reduce carbon dioxide emissions caused by cement production. Current research aims to find the most optimum locally available materials that can serve as replacement for cement. Thermogravimetric analysis (TGA) ranks among the methods used to characterize potential materials. This paper presents results of such analysis performed on six clay soil samples. The approximated quantity of clay mineral, calculated by means of TGA, is compared with the reactivity test (R3 test) using isothermal calorimetry. The results indicate that selected soil samples can be considered as low-grade kaolinitic clays. Nevertheless, they show a good correlation between clay mineral content and reactivity of the sample.

Key words: Thermogravimetric analysis, cementitious materials, clay, kaolin content, R3 test

Upotreba termogravimetrijske analize kod karakterizacije glina kao cementnih dodataka

Sažetak

Korištenje velikih udjela cementnih dodataka može utjecati na smanjenje emisija ugljikovog dioksida uzrokovanih proizvodnjom cementa. Istraživanja su usmjerena prema pronalasku najoptimalnijih lokalno dostupnih materijala koji mogu poslužiti kao cementni dodaci. Termogravimetrijska analiza (TGA) jedna je od metoda koja se koristi za karakterizaciju potencijalnih materijala. U radu su prikazani rezultati takve analize provedeni na šest uzoraka glina. Aproximirana količina minerala kaolinita dobivena TGA-om uspoređena je s količinom oslobođene topline prilikom ispitivanja reaktivnosti uz pomoć izotermalne kalorimetrije (R3 metodom). Rezultati ukazuju na ovisnost reaktivnosti gline o sadržaju tog minerala, te na smanjeni udio kaolina u ispitanim materijalima u odnosu na gline iz literature.

Ključne riječi: termogravimetrijska analiza, cementni dodaci, gline, sadržaj kaolina, R3 test

1 Introduction to the use of thermogravimetric analysis

Faced with the growing need to reduce the CO₂ intensive cement clinker, researchers are constantly investigating new materials that can be used as cement replacements. The quest for new cementitious materials, that could satisfy current mechanical and durability requirements when used for concrete, pointed to the need for advanced characterisation techniques. These approaches rely on the knowledge of material structure, chemical and mineralogical composition, and physical properties of particles. Current research aims to correlate various characterising parameters to rank possible supplementary cementitious materials (SCMs) [1-2]. Thermogravimetric analysis (TGA) is one of advanced techniques used in such research. Thermogravimetry (TG) is a widely spread technique that measures and tracks mass change as a function of temperature. In the field of cement science, it is used for quantification and identification of minerals and hydrates. It is a powerful tool that can also detect amorphous phases, such as C-S-H or AH₃, which is why it is often used as a technique complementary to X-ray diffraction (XRD).

1.1 Parameters that influence thermogravimetric measurement

The results of thermogravimetric analysis are subject to various influences such as device settings, sample preparation and/or material composition. The device settings that affect the measurement are: heating rate, gas flow rate, type of thermocouples, vessel shape, and sample particle arrangement [3]. The preparation of samples is equally important and can also have a major impact. Some of the factors that can influence the results include sampling, particle size of material, sample amount, hydration stoppage and drying method [3–6]. It is emphasized in every study that a constant procedure is of highest significance for ensuring reliable and repeatable results. Salvador et al. [6] focused their analysis on the influence of grinding process and gas flow rate, while Scrivener et al. [4] pointed out that the material sample should not be pressed into the measuring vessel but should rather be placed lightly and evenly. Although it is a common practice to normalize TGA and DTA data by weight (100% by weight), which facilitates comparison of different sample masses, it has been shown that larger differences in sample mass give unreliable results [4]. Scrivener et al [4] also recommend that the value of 50 mg be adopted as an optimum sample mass for TGA, while Smykatz-Kloss [5] lists other recommendations as shown in Table 1.

Table 1. Device setup and sample preparation recommendations for thermogravimetric analysis [5]

Parameter	Recommendation	
Particle size	Clay: 0.6 - 2 μm \emptyset	
	Other material: 60 - 200 \emptyset	
Oven	Uniform air flow	
Heating rate	10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	
Sampling	sample lightly placed (not pressed) in the vessel	
Sample hardness	Mohs scale	Grinding method
Extremely hard sample	> 6,5	3-minute manual crushing with a mortar
Hard sample	4,5 – 6,5	1-minute grinding in a ball mill at low speed (500 g, 3 balls < 2,5 cm \emptyset)
Soft sample	< 4,5	2-minute manual pulverization with a grinder

1.2 Qualification and quantification of most common phases

Minerals and hydrates undergo several decomposing reactions when heated: dehydration, dehydroxylation, decarbonation, oxidation, phase change, or melting [4]. These reactions are usually associated with the change in mass and/or heat release, and they occur in a specific temperature range. This knowledge provides information for identification or even quantification of certain phases. The data obtained from TGA are displayed either as weight loss vs. temperature or as a first derivative of that curve (Figure 1). The derivative curve (DTG) emphasizes the temperature ranges of significant mass loss.

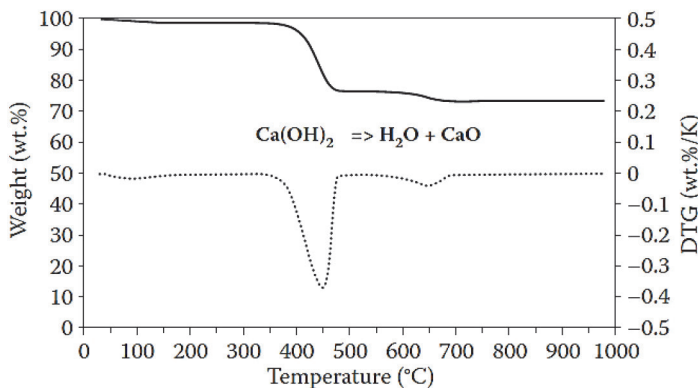


Figure 1. Mass loss recorded by TGA (solid line) and first derivative of that curve - DTG (dashed line) [4]

As mentioned before, TGA is often used to characterise cementitious materials such as limestone, fly ash, slag and clay. The analysis is based on distinctive DTG curve peaks that can be observed when analysing these materials. Natural pozzolans (and

other materials) that are collected from open landfills most often contain some moisture. This is why a significant DTG peak and a higher mass drop at lower temperatures (up to 200 °C) can be observed, which is related to the loss of free and chemically-bound water [7]. Calcium rich materials, such as fly ash or some slags, can contain portlandite $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, which dehydroxylates $[\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}]$ in the temperature range of approximately 460 °C [4]. Dehydroxylation of clay minerals starts at around 350 °C and ends near 850 °C (depending on the mineralogy) when clay structure collapses and forms amorphous phases [8]. This is a desirable process that activates clay minerals, and they obtain pozzolanic properties. The most reactive clay mineral is kaolinite, which transforms its structure between 450 °C and 550 °C forming metakaolin [9], but often overlaps with the dehydroxylation of illite. Ground limestone is a common cementitious material, lately often used in ternary cement blends [10]. Calcium carbonate (CaCO_3) is the main element of limestone but can also be found in other cementitious materials. The CaCO_3 content can be determined by measuring the mass loss between 700 °C to 850 °C, which is the mass of carbon dioxide loss due to decomposition of CaCO_3 [11]. The weight loss caused by decomposition of these elements can be used for their quantification using molecular masses.

2 Thermogravimetric analysis of local clay samples

2.1 Materials and methods

Six samples of clay soil were selected and analysed as a part of the ACT project. These materials, natural clays originating from the Southeast Europe, were collected from five different excavation sites. All samples were treated prior to the measurement by drying for 24 ± 2 h at 60 ± 5 °C in an aerated oven and by grinding in a disc mill for 30 seconds.

Chemical analysis and particle size of treated samples were determined by X-ray fluorescence (XRF) and particle-size distribution (PSD), respectively. The corresponding test results are shown in Table 2 with respect to the ordinary Portland cement (OPC) sample. All clays show a higher amount of silica (SiO_2) and a significantly smaller amount of calcium oxide (CaO) when compared to the CEM I 42,5 R sample (OPC). The difference is also visible in alkali content, where clays exhibit a higher sum of sodium (Na_2O) and potassium oxides (K_2O). An average particle size of all clays varies from 8.2 to 15.4 μm , which is similar to the OPC average particle size of 9.95 μm .

Table 2. Chemical composition and particle size of clay samples after treatment

Label	Chemical composition (%)											Average particle size
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃	D (v, 0.5)
OPC	64.04	19.32	4.86	2.94	1.83	0	0.23	0.82	0	0	2.75	9.95
TOP	2.09	64.59	20.55	6.39	1.74	0.34	0.94	2.32	0.89	0.09	0.10	10
KaVa_1	2.01	63.06	24.97	3.09	1.38	0.28	0.48	3.95	0.71	0.01	0.07	8.6
KaVa_2	2.02	63.79	24.26	3.42	1.28	0.28	0.50	3.75	0.64	0.01	0.08	8.2
NC	2.57	63.70	19.53	6.80	2.34	0.35	1.26	2.52	0.76	0.08	0.12	13.4
SIVk	2.53	63.87	19.28	6.55	2.25	0.43	1.27	2.91	0.77	0.10	0.08	14.1
IGM	2.43	64.28	19.75	6.26	2.11	0.39	1.30	2.54	0.80	0.09	0.07	15.4

The thermogravimetric analysis was performed in the Laboratory for advanced testing of materials (LATOM) at the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb. For each TGA measurement, 50±5 mg of material were placed in a platinum crucible. When transferred to the instrument, the samples were first stabilised at 30 °C, then heated until 800 °C at a constant heating rate of 20 °C/min, and at a constant nitrogen gas flow rate of 30 ml/min. Lastly, the mass loss was calculated by means of the stepwise tangential method using Trios software [12] within predefined temperature ranges. The clay mineral content was approximated according the stated formula, where the mass loss in the range of dehydroxylation was multiplied with the fraction of molecular masses:

$$Clay_{content} = WL_{dehydroxylation} \cdot \frac{m_{clay\ min}}{n \cdot m_{H_2O}} \quad (1)$$

For the purpose of preliminary characterisation, an assumption was made that the mass loss between 350 °C and 600 °C is connected to the dehydroxylation of kaolinite ($WL_{dehydroxylation}$). For a simplified calculation of kaolinite content this value was multiplied with the fraction of kaolinite molecular mass ($m_{kaolinite}=256$ g/mol) and two molecules of water ($m_{water}=18$ g/mol) [13].

The approximated kaolinite content was then correlated to the results obtained from the R3 test. This test was developed for the RILEM TC-267 committee to address the reactivity of SCMs such as clays. It is performed on pastes using isothermal calorimetry set at 40 °C to enhance the reaction. The pastes are made from blends containing 10 g of SCM and the mix of solids with the ratio of $Ca(OH)_2/SCM$ and $CaCO_3/SCM$ of 3 and ½, respectively. The solution used in the paste is made of alkalis, KOH and K_2SO_4 . All reagents were held for 24h at a constant temperature of

40 °C prior the mixing. The mixing was conducted using a high shear mixer at 1600 ± 50 rpm for 2 min after which 15 g of pastes were immediately placed into the glass vial and into the calorimeter.

2.2 Results

TGA results are shown in Figure 2 which displays the weight loss curve as well as the DTG curve for each of the six clay samples. The first weight loss can be observed due to dehydration of water and moisture content in clays, marked as free water. This indicates that the drying procedure was not completed and should be prolonged or performed at a higher temperature. The biggest DTG peak appears from 350 °C to 600 °C in all clays. This is the characteristic dehydroxylation temperature of most common clay minerals – kaolinite and illite, which partially overlap. The various clay minerals present have different reactivities: namely, highly reactive kaolinite (1:1) clay versus much lower reactivity of the 2:1 clays. The difference between clay samples is most evident in this temperature range, where samples KaVa_1 followed by KaVa_2 show the biggest DTG peak.

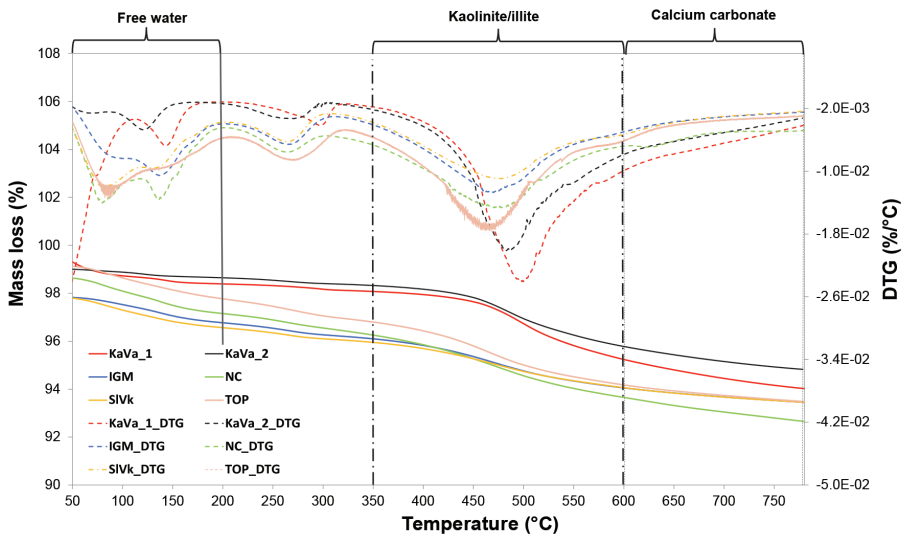


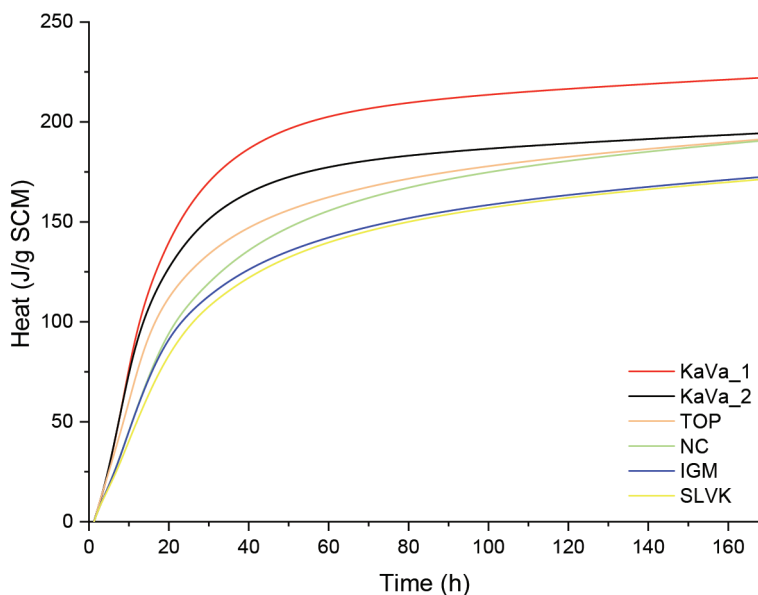
Figure 2. Thermogravimetric analysis of selected clay samples showing mass loss (solid line) and derivative curve (dashed line)

Table 2 shows obtained mass loss percentage in the distinctive temperature range, from 350°C to 600°C. The mass loss obtained from the TG analysis was used to calculate the clay mineral content. Sample KaVa_1 has the highest value of clay minerals, more than 21%. KaVa_2 is the second ranked sample with 19.29%, followed by TOP and NC samples. Samples SIVk and IGM have the lowest quantity of clay minerals, less than 12% of the total mass.

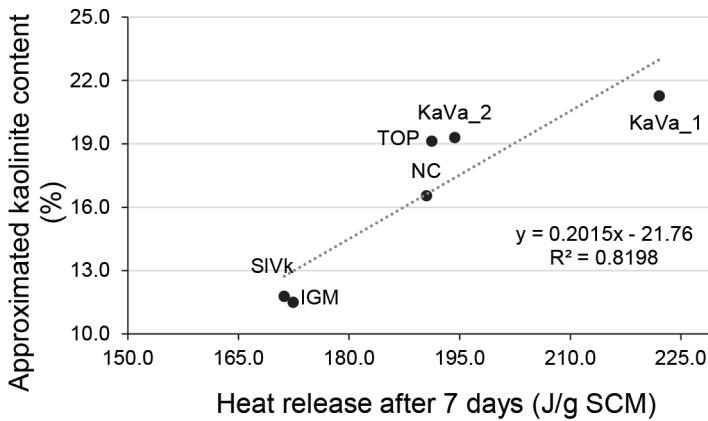
Table 3. Mass loss obtained by thermogravimetric analysis and calculated clay mineral content

Sample	Mass loss [%] 350 – 600	Approximated kaolinite content [%]
KaVa_1	2.99	21.26
KaVa_2	2.713	19.29
IGM	1.616	11.49
NC	2.326	16.54
SIVk	1.656	11.78
TOP	2.69	19.13

The outputs of R3 test are shown in Figure 3 where cumulative heat release reported per g of SCM in time is shown. All clay samples display a similar trend, fast heat release in the first 15 h of reaction, and then a slower reaction after 24h. Sample KaVa_1 again shows the highest value, followed by KaVa_2, Top, and NC samples. The lowest heat release is exhibited by IGM and SIVk samples.

**Figure 3. R3 test results shown as heat release in time**

The correlation of results obtained by the two tests, the TGA test and R3 test, is shown in Figure 4. The correlation coefficient (R^2) indicates a strong positive linear relationship between the results, which implies the influence of clay mineral content on the reactivity of clay as SCM.



- Kaolinite content vs heat release Linear (Kaolinite content vs heat release)

Figure 4. Correlation of clay mineral content and heat release after 7 days for each clay sample

3 Conclusion and further research

This paper presents an example of thermogravimetric analysis of supplementary cementitious materials focusing on characterisation of raw clay. All selected samples show a substantial weight loss in a temperature range from 350 °C to 800 °C, which is typical for the dehydroxylation process of clay minerals. This process causes the distinctive clay minerals to convert into an amorphous state. What should be considered is that the DTG curves of several clay minerals overlap in this temperature range, which makes it difficult to differentiate them. The difference could be more visible in the DTG curve by performing a more precise measurement in the critical temperature range (using lower heating rate). The presence of minerals kaolinite, illite and montmorillonite should be confirmed with other methods such as XRD. The mass fractions of all relevant clay minerals could then be calculated and compared using idealised stoichiometries. Nevertheless, with a simplified calculation and assumption that the weight loss from 350 °C to 600 °C is related to the dehydroxylation of kaolinite, we could calculate and rank the selected clays accordingly. The clay sample KaVa_1 has the highest value, with 21%, while the IGM sample has the lowest value of only 11%. These results indicate that selected samples can be considered as low-grade kaolinitic clays and should be subjected to higher calcination temperatures than the kaolinitic ones [14 - 15] when used as SCMs. The influence of clay mineral content on the increase of pozzolanic properties of clays was verified by correlation to the R3 test results. The outputs again show sample KaVa_1 as the most suitable one, while the lowest reactivity is exhibited by SIVk and IGM samples.

Further research should be focused on a precise assessment of all clay minerals, followed by activation of the most viable samples. This is a part of the ACT project that aims to optimise cement substitution for standard strength concrete. In the upcoming period the chemical and physical characteristics of local materials, obtained by advanced testing methods, will be correlated with mechanical properties of mortars containing these SCMs. This will provide an insight into the most important parameters of raw materials that could potentially serve as high volume cement replacements.

Acknowledgement

The presented research is a part of a scientific project “Advanced low CO₂ cementitious materials” – ACT (No. IZHRZO – 180590), that is financed within the Croatian-Swiss Research Program of the Croatian Science Foundation and the Swiss National Science Foundation with funds obtained from the Swiss-Croatian Cooperation Programme. First two authors also acknowledge the support of the project “Alternative binders for concrete: understanding microstructure to predict durability, ABC”, financed by Croatian Science Foundation under No. UIP-05-2017-4767.

References

- [1] Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N., and Ukrainczyk, N.: Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials, *Journal of Cleaner Production* (2019), vol. 229, pp. 1045–1064.
- [2] Sigvardsen, N. M., Kirkelund, G. M., Jensen, P. E., Geiker, M. R., and Ottosen, L. M.: Impact of production parameters on physiochemical characteristics of wood ash for possible utilisation in cement-based materials, *Resources, Conservation and Recycling* (Jun. 2019), vol. 145, pp. 230–240.
- [3] Maria Foldvari, B., *Handbook of thermo-gravimetric system of minerals and its use in geological practice*, vol. 213., Hungary: Geological Institute of Hungary, 2011.
- [4] Scrivener, K., Snellings, R., and Lothenbach, B., *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [5] Smykatz-Kloss, W., *Differential thermal analysis; application and results in mineralogy*. Springer-Verlag, 1974.
- [6] Salvador, A. R., Calvo, E. G., and Aparicio, C. B.: Effects of sample weight, particle size, purge gas and crystalline structure on the observed kinetic parameters of calcium carbonate decomposition, *Thermochimica Acta* (May 1989), vol. 143, pp. 339–345.

- [7] Saamiya Seraj, P.: Evaluating Natural Pozzolans for Use as Alternative Supplementary Cementitious Materials in Concrete, PhD Disertation, The University of Texas, Austin, pp. 176, 2014.
- [8] Flegar, M., Serdar, M., Londono-Zuluaga, D., and Scrivener, K.: Overview of clay as supplementary cementitious material, 5th Symposium on Doctoral Studies in Civil Engineering, pp. 163–174, 2019.
- [9] Romero-Guerrero ,L. M., Moreno-Tovar, R., Arenas-Flores, A., Marmolejo Santillán, Y., and Pérez-Moreno, F.: Chemical, mineralogical, and refractory characterization of kaolin in the regions of Huayacocotla-Alumbres, Mexico, *Advances in Materials Science and Engineering* (2018), vol. 2018.
- [10] Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., and Pillai, R. G.: Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3) (2018), *Cement and Concrete Research*, vol. 107, pp. 136–151.
- [11] Bernal, S. A. et al.: Characterization of supplementary cementitious materials by thermal analysis, *Materials and Structures* (2017), vol. 5.
- [12] “Trios Software v5.1.0 [Computer software].” 2020.
- [13] Msinjili, N. S., Gluth, G. J. G., Sturm, P., Vogler, N., and Kühne, H.-C.: Comparison of calcined illitic clays (brick clays) and low-grade kaolinitic clays as supplementary cementitious materials, *Materials and Structures* (2019), vol. 52.
- [14] Taylor-Lange, S. C., Lamon, E. L., Riding, K. A., and Juenger, M. C. G.: Calcined kaolinite-bentonite clay blends as supplementary cementitious materials, *Applied Clay Science* (2015), vol. 108, pp. 84–93.
- [15] Avet, F. and Scrivener, K.: Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3), *Cement and Concrete Research* (2018), vol. 107, pp. 124–135.

Ocjenjivanje seizmičke oštećljivosti postojećih mostova pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja

Gordana Hrelja Kovačević¹, prof. dr. sc. Ana Mandić Ivanković²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, gordana.hrelja.kovacevic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ana.mandic.ivankovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Mostovi su važan dio prometne infrastrukture, a podaci dobiveni ocjenom seizmičke oštećljivosti mostova važan čimbenik u donošenju odluka o postupcima sanacije i o postupcima koji slijede nakon potresa. U Hrvatskoj postoji značajan broj mostova koji su izgrađeni prije stupanja na snagu niza normi HRN EN 1998 za seizmički proračun konstrukcija, te je stoga važno provesti ocjenjivanje njihove potresne oštećljivosti. Ocjenjivanje mostova provodi se pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja. U radu je prikazana metodologija izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja uz prikaz osnovnih tipova mostova u Hrvatskoj.

Ključne riječi: postojeći mostovi, potresno opterećenje, granično stanje, inkrementalna dinamička analiza, krivulje vjerojatnosti oštećenja

Assessing seismic vulnerability of existing bridges using fragility curves

Abstract

Bridges are an important part of transport infrastructure, and the data obtained by assessing seismic vulnerability of bridges are an important factor in making decisions about rehabilitation procedures and post-earthquake procedures. A significant number of bridges were built in Croatia in the pre-Eurocode era, and it is therefore important to perform an assessment of their seismic vulnerability. The assessment of bridges is carried out using probability curves. The methodology for development of probability curves is presented, and a short overview of basic types of bridges in Croatia is given.

Key words: existing bridges, seismic load, limit state, incremental dynamic analysis, fragility curves

1 Uvod

U svijetu je već duže vrijeme aktualna tema ocjene seizmičke oštjetljivosti postojećih građevina, pa tako i mostova. Ocjenjivanje oštjetljivosti provodi se za specifične regije (države), uzimajući u obzir specifičnosti mostova i potresno opterećenje mjerodavno za pojedino područje [1-5].

Mostovi su iznimno važan dio prometne infrastrukture, a naročito nakon izvanrednih događaja kao što je potres, kada je nužno osigurati komunikaciju s ugroženim područjima. U Hrvatskoj postoji veliki broj mostova na ključnim prometnicama koji je projektiran i građen prije stupanja na snagu niza normi HRN EN 1998 [6, 7] za seizmički proračun konstrukcija. Prije spomenutih normi mostovi su projektirani uzimanjem potresnog djelovanja prema tadašnjim propisima [8, 9].

Upravo ti mostovi sada su došli do trenutka kada je potrebna njihova sanacija. Prilikom odluke o sanaciji nekog mosta postavlja se pitanje i njegove otpornosti na potres, međutim, rijetko se analizira potresna otpornost postojećih mostova, a još rjeđe ili gotovo nikada ne provodi se ojačanje mosta.

Razlog za to je, dijelom, i nepostojanje propisa koji bi regulirao zahtjeve potrebne otpornosti kod velikog broja postojećih građevina, pa tako i mostova. Naime, europska norma EN 1998-3 [10] odnosi se primarno na ocjenjivanje i obnavljanje zgrada.

Slijedom navedenoga, procjena potresne oštjetljivosti postojećih mostova pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja, daje korisne informacije o stanju postojećih mostova, koje mogu pomoći prilikom donošenja odluka o sanaciji mostova, ali i o postupcima i prioritetima nakon potresa.

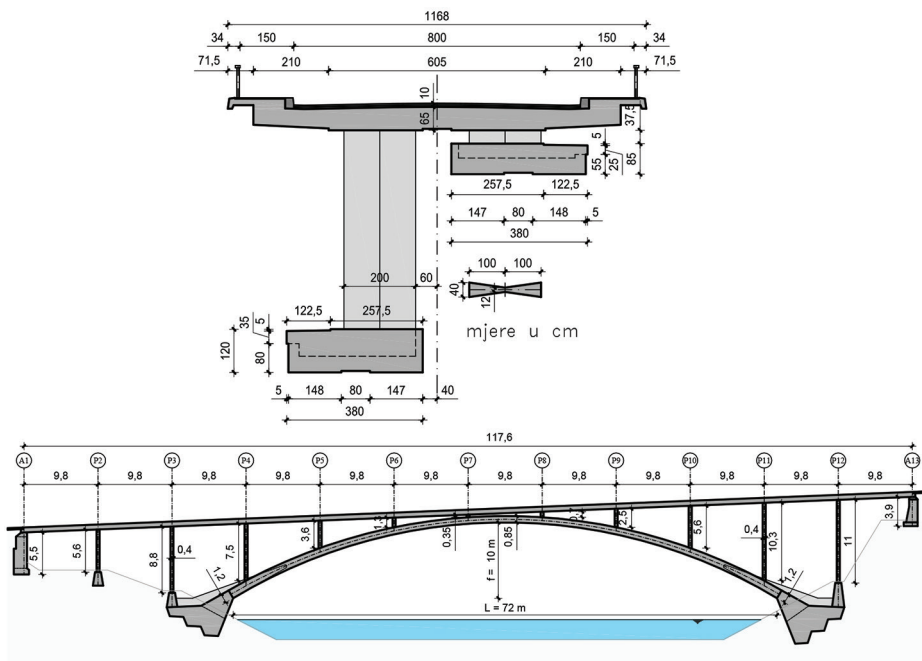
Potresna oštjetljivost odnosi se na opasnost ili izloženost premašaju pojedinih graničnih stanja oštećenja [11].

U nastavku su prikazani osnovni tipovi postojećih mostova u Hrvatskoj i metodologija izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja.

2 Mostovi u Hrvatskoj

U ovom poglavlju opisani su značajniji tipovi i prikazani primjeri betonskih mostova sagrađenih u Hrvatskoj, počevši od 50-ih godina prošlog stoljeća pa do danas.

Nakon Drugog svjetskog rata, mostovi manjih raspona (do 30 m) građeni su od armiranog ili prednapetog betona pločastog ili rebrastog poprečnog presjeka. Mostovi većih raspona su lučni mostovi (slika 1.) ili pak gredni mostovi sandučastog poprečnog presjeka od prednapetog betona građeni na skeli ili postupkom slobodne konzolne gradnje. Šezdesetih godina prošlog stoljeća počinje upotreba predgotovljenih prednapetih nosača u gradnji mostova.

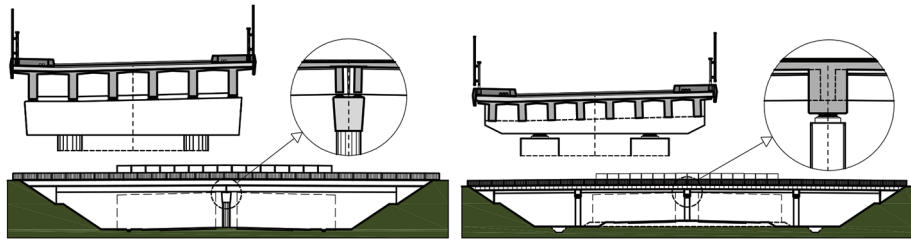


Slika 1. Uzdužni i poprečni presjek mosta preko Slunjiće u Slunju

Kad promatramo betonske mostove (armiranobetonske i mostove od prednapetog betona), u Hrvatskoj su mnogi mostovi građeni tzv. polumontažnom gradnjom, a njihova je karakteristika da rasponski sklop čine predgotovljeni prednapeti nosači s dobetoniranom kolničkom pločom (slika 2). Prethodne varijante takvih mostova građene su bez dobetonirane ploče povrh montažnih nosača.

U statičkom smislu postoji više varijacija ovakvih mostova: niz prostih greda, niz prostih greda s kontinuitetnom pločom povrh stupova, kontinuirani rasponski sklopovi pri čemu se kontinuitet iznad stupova uspostavlja mekom armaturom, integralni spoj rasponskog sklopa i stupova (ponekad i upornjaka).

Predgotovljeni prednapeti nosači, koji su korišteni, različitih su oblika (ovisno o opremi izvoditelja). Oslanjanje nosača na donji ustroj (stupove i upornjake) ostvareno je preko neoprenskih ležajeva za sustav prostih greda, a za kontinuirane sustave oslanjanje se realizira preko neoprenskih, lončastih ili u novije vrijeme preko kalotnih ležajeva.



Slika 2. Poprečni presjeci nadvožnjaka s predgotovljenim prednapetim nosačima (lijevo niz prostih greda, desno s uspostavom kontinuiteta iznad stupova)

Velika prednost polumontažnih mostova je izostanak skele i oplate duž raspona, pa samim time jednostavnost i velika brzina gradnje, te su oni bili najčešće korišteni sustavi pri izgradnji većine dionica na autocestama [12].

Mostovi građeni prije 1990. (a ujedno i prije nego se počela projektirati trajnost betona) imaju značajno manje dimenzije u odnosu na mostove koji su projektirani prema današnjim smjericama, što ima za posljedicu, s jedne strane veće degradacije i oštećenja uslijed djelovanja vode, okoliša i sl., a s druge strane, elementi tih mostova imaju manju težinu (rasponski sklop) i vitkiji su (stupovi).

U vrijeme gradnje polumontažnih mostova, a naročito prije pojave takve gradnje, građeni su i monolitni mostovi pločastog ili rebrastog presjeka, vrlo često s monolitnim spojem na elemente donjeg ustroja.

2.1 Projektiranje i detaljiranje mostova na potresno opterećenje prije EC8

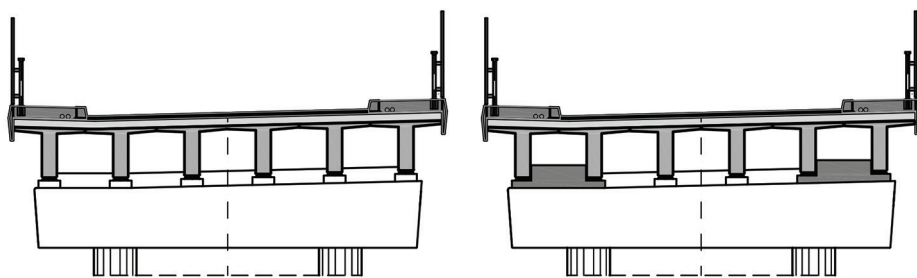
Opterećenja na koja su projektirani mostovi mijenjala su se kroz povijest, pa tako i ona potresna, pri čemu sadašnji propisi [6, 7] propisuju najveća opterećenja. Osim toga, razvoj hardvera i softvera, koje danas imamo na raspolaganju, omogućuju provedbu složenijih analiza u kraćem vremenu.

Ovisno o statičkom sustavu mosta, potresno opterećenje koje se prenosi s rasponskog sklopa na donji ustroj može biti raspodijeljeno na sve elemente donjeg ustroja, ovisno o njihovoj krutosti, što je slučaj kad se oslanjanje rasponskog sklopa na sve elemente donjeg ustroja ostvaruje na isti način. To je slučaj kod monolitne veze rasponskog sklopa na sve elemente donjeg ustroja i kod oslanjanja preko neoprenskih ležajeva podjednake krutosti.

Korištenjem kliznih ležajeva (lončasti, kalotni i slični ležajevi koji imaju klizne plohe), pojedine elemente donjeg ustroja možemo isključiti iz prijenosa potresnog opterećenja (samo za jedan ili za oba smjera), a s druge strane upotrebom fiksnih ležajeva (također lončasti, kalotni i slični) prenosimo potresno opterećenje samo na one elemente donjeg ustroja na koje to želimo. Naravno, moguće su kombinacije svih načina oslanjanja na jednom mostu.

Kod prije spomenutih polumontažnih mostova sustava niza prostih greda oslanjanje je, u pravilu, ostvareno preko neoprenskih ležajeva (tzv. "plivajuće" oslanjanje), kod kojega nije ograničeno poprečno ni uzdužno pomicanje rasponskog sklopa (ne postoje nepomični ležajevi). Vrlo često kod takvih mostova prijašnja generacije (prije EC) nije ostvareno ni dovoljno nalijeganje na elemente donjeg ustroja.

Pojavom novih propisa, ali i analizom sličnih mostova, uglavnom u SAD-u, počeli su se često u takvim dispozicijama mostova koristiti tzv. seizmički blokovi (ili seizmički graničnici) (slika 3.), koji sprečavaju "slijetanje" rasponskog sklopa sa stupova ili upornjaka, ali osim toga služe i za rasipanje seizmičke energije te dio potresne sile prenose na donji ustroj.



Slika 3. Oslanjanje prednapetih nosača naglavnicu stupa: bez seizmičkih graničnika (lijevo), sa seizmičkim graničnicima (desno)

Daljnijim istraživanjem bit će obuhvaćeni gredni mostovi na autocestama i državnim cestama. U istraživanju će biti napravljena sistematizacija postojećih mostova u odnosu na parametre koji se pokazuju ključnima za procjenu rizika od potresa. Razmotrit će se godina izgradnje/projektiranja kao pokazatelj po kojim propisima je analiziran potres, tip rasponskog sklopa (prednapeti montažni nosači s dobetoniranom pločom ili bez nje, monolitni rasponski sklop...), statički sustav (niz prostih greda sa seizmičkim graničnicima i bez njih, kontinuirani sustav, okvirni sustav, miješani sustav...) i ostali parametri koji se pokazuju značajnima.

Za ocjenu seizmičke oštećljivosti mostova koji nisu projektirani i detaljizirani prema suvremenim propisima, u današnje vrijeme najčešće se koriste krivulje vjerojatnosti oštećenja koje se objašnjavaju u sljedećem poglavlju.

3 Krivulje vjerojatnosti oštećenja

3.1 Općenito o krivuljama vjerojatnosti oštećenja

Krivulja vjerojatnosti oštećenja je prikaz funkcije vjerojatnosti oštećenja i predstavlja vjerojatnost da će nastupiti granično stanje (oštećenje) konstrukcije ili nekog njenog dijela uslijed djelovanja potresa određenog intenziteta.

Kao što je već ranije spomenuto, u Hrvatskoj, ali i u svijetu, brojni su mostovi projektirani i izgrađeni prije stupanja na snagu suvremenih propisa za potresno projektiranje. S obzirom na važnost mostova u prometnoj infrastrukturi, postavlja se pitanje ponašanja tih mostova na potresno opterećenje. Širom svijeta razvijane su metode procjene oštećljivosti postojećih mostova uslijed potresnog djelovanja [13].

Vjerojatnost oštećenja konstrukcije, odnosno mosta, uvjetna je vjerojatnost i može se prikazati kao vjerojatnost da će nastupiti granično stanje nekog elementa mosta pri djelovanju potresnog opterećenja određenog intenziteta [13]:

$$\text{Vjerojatnost oštećenja} = P[LS | IM=y] \quad (1)$$

gdje je LS granično stanje (Limit State), IM je intenzitet potresnog djelovanja (Intensity Measure).

Krivulje vjerojatnosti oštećenja počinju se razvijati 70-ih godina prošlog stoljeća [13], a od kraja 90-ih FEMA (Federal Emergency Management Agency) razvija softvere za ocjenu potresnog rizika Hazard United States (HAZUS) [14]. U posljednjih dvadesetak godina krivulje vjerojatnosti oštećenja razvile su se u učinkovit alat pri donošenju odluka vezano za sanaciju odnosno ojačavanje postojećih mostova kao i za postupanja nakon potresa [15].

Konstrukcija krivulja vjerojatnosti oštećenja moguća je na više načina [2, 13]:

- **krivulje na temelju mišljenja stručnjaka (Expert-base/judgmental fragility curves)** konstruiraju se na temelju mišljenja stručnjaka iz područja potresnog inženjstva
- **empirijske krivulje vjerojatnosti oštećenja** konstruiraju se na temelju iskustava iz prethodnih potresa, odnosno na temelju podataka o oštećenjima građevina nakon potresa
- **eksperimentalne krivulje vjerojatnosti oštećenja** nisu uobičajene jer njihovo konstruiranje iziskuje veća financijska sredstva da bi se mogli izrađivati uzorci (modeli cijelih mostova ili dijelova mosta) u velikom broju radi dovoljno podataka za konstruiranje krivulja
- **analitičke krivulje vjerojatnosti oštećenja** konstruiraju se pomoću provedenih analiza konstrukcija za različita potresna opterećenja.

Slijedi detaljniji opis analitičke metode.

3.2 Analitičke krivulje vjerojatnosti oštećenja

Analitičke krivulje vjerojatnosti razvijaju se u novije vrijeme zahvaljujući mogućnostima i razvoju softvera za proračune. Za različite intenzitete potresnog djelovanja provode se proračuni modela (statički ili dinamički), a podaci koji se dobiju iz prora-

čuna su baza za statističku analizu i dalje konstruiranje krivulja vjerojatnosti oštećenja. Funkcija vjerojatnosti oštećenja najčešće se definira lognormalnom funkcijom razdiobe prikazanom u jednadžbi (2) [1] i predstavlja vjerojatnost (P) da će zahtjev na konstrukciju (D) biti veći od kapaciteta konstrukcije (C) pri djelovanju potresa određenog intenziteta (IM):

$$P[D > C | IM] = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{S_D}{S_C} \right)}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}} \right) \quad (2)$$

gdje se D i C odnose na zahtjeve i kapacitet pojedinih elemenata mosta (engl. demand and capacity), a S_D i S_C su medijani zahtjeva odnosno kapaciteta. $\beta_{D|IM}$ i β_C su standardna devijacija zahtjeva odnosno kapaciteta.

Krivulje vjerojatnosti oštećenja mogu se izrađivati za pojedinačne mostove ili za određene skupine mostova gdje se raznim statističkim metodama ili parametarskom analizom mogu uzeti u obzir razne varijacije. Osnovni koraci u izradi krivulja vjerojatnosti oštećenja su [16]:

1. Određivanje graničnih stanja (kapaciteta, C) pojedinih elemenata mosta koje uključuje određivanje svih parametara vezano za geometriju, karakteristike materijala, proračune graničnih stanja. Po potrebi se rade usklađivanja modela sa stvarnim stanjem na temelju ispitivanja postojećih mostova (naročito ako ne postoje projekti ili pouzdani podaci o građevini). Granična stanja pojedinih elemenata mosta potrebno je definirati na način koji se kasnije može povezati sa zahtjevima (npr. pomak vrha stupa koji se može ostvariti prije otkazivanja nosivosti stupa). Određivanje graničnih stanja nekih postojećih mostova prikazano je u radovima [17, 18].
2. Određivanje zahtjeva (demand, D) za pojedine elemente mosta predstavlja provođenje analize na modelu mosta za potresno opterećenje određenog intenziteta (IM), rezultat koje je npr. pomak stupa.
3. Prema podacima iz prethodna dva koraka konstruiraju se krivulje vjerojatnosti oštećenja.

Koraci 2 do 3 detaljnije su opisani u sljedećim poglavljima.

3.3 Statička i dinamička analiza mostova

Pojednostavljeno, analiza koja se provodi za određeni most može biti statička ili dinamička, linearna ili nelinearna (materijalno i geometrijski).

Koja će analiza biti provedena ovisi o razini projektiranja, vrsti mosta, veličini mosta, intenzitetu potresnog opterećenja itd.

Za izradu krivulja vjerojatnosti oštećenja mogu se primijeniti sljedeće analize [1]:

- statička analiza metodom postupnog guranja
- dinamička analiza metodom spektralnog odziva
- nelinearna dinamička analiza (engl. non linear time history analysis NLTHA)
- inkrementalna dinamička analiza (IDA)

U novije vrijeme, za potrebe izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja, najčešće se koristi inkrementalna dinamička analiza [1].

3.3.1 Inkrementalna dinamička analiza

Inkrementalna dinamička analiza je nelinearna dinamička analiza koja se provodi za različite veličine potresnog opterećenja. Detaljni prikaz ove metode dali su Vamvatsikos i Cornell [19]. Potresna opterećenja se u analizi zadaju u obliku vremenskog zapisa i skaliraju se odnosno inkrementalno uvećavaju ili smanjuju, te se za svaki korak skaliranja provodi analiza. Ovakav način analize omogućava nam uvid u ponašanje konstrukcije za različite jačine potresa. Kroz smanjenje i uvećanje početnog zapisa prolazi konstrukcija kroz sve faze, od elastičnog ponašanja, preko tečenja pa do konačnog sloma ili gubitka stabilnosti.

U nastaku su navedeni osnovni pojmovi vezani za ovu analizu [19, 11].

Faktor skaliranja (engl. Scale Factor, SF), predstavlja pozitivni cijeli broj (veći od 1 za uvećanje ili manji od 1 za umanjeње) kojim se skalira osnovni potresni zapis.

Mjera intenziteta potresa (engl. A Monolithic Scalable Ground Motion Intensity measure, Intensity Measure, IM) parametar je koji predstavlja relativnu jačinu potresnog djelovanja. S obzirom na to da to mora biti parametar koji se može smanjivati/uvećavati (skalirati), najčešće se koriste: vršno ubrzanje temeljnog tla (PGA), vršna brzina temeljnog tla (PGV), spektralno ubrzanje za prvi vlastiti period s 5 % prigušenja $S_a(T_1, 5 \%)$. Moguća je primjena snimljenih potresnih zapisa, ali i numerički simuliranih potresnih zapisa [20].

Mjera odziva konstrukcije je mjera ponašanja konstrukcije pod potresnim opterećenjem i , vezano na prethodno poglavlje, predstavlja zahtjeve na konstrukciju. Kod zgrada je to najčešće iskazano kao međukatni pomak konstrukcije, a kod mostova to može biti više parametara, ovisno o specifičnostima pojedinog mosta (rotacija temelja, pomak vrha stupa, pomak ili rotacija upornjaka, itd). Ukupni odziv mosta kao

sustava, sastoji se od odziva pojedinih elemenata mosta, pri čemu treba imati na umu da nisu svi elementi mosta podjednako važni za njegovu stabilnost. Primjerice slom stupa uzrokovat će rušenje mosta, ali slom prijelazne naprave neće sam po sebi biti uzrok rušenja mosta. Podjela elemenata mosta na primarne i sekundarne, u odnosu na utjecaj na stabilnost cijelog mosta prikazan je u [1], za potrebe izrada krivulja oštećenja mostova u Kaliforniji.

Poželjno je definirati više razina oštećenja, pa su tako u [1] definirane četiri razine oštećenja za primarne elemente mosta (najmanje oštećenje je estetske prirode a najveće predstavlja oštećenje koje implicira zamjenu elementa), a za sekundarne elemente definirana su dva stupnja oštećenja. Krivulje vjerojatnosti oštećenja izrađuju se za svaku razinu oštećenja.

Jedan zapis IDA analize predstavlja rezultate parametarske dinamičke analize određenog modela, gdje je parametar faktor skaliranja. Dakle, za jedan zapis ubrzanja tla (akcelegogram) provodi se više nelinearnih dinamičkih analiza (NLTHA) za svaki korak skaliranja. Za svaki korak (IM) bilježi se mjera odziva (damage measure, DM). **IDA krivulja** je krivulja konstruirana za sve korake skaliranja za pripadni zapis (IM) i pripadne mjere odziva (DM).

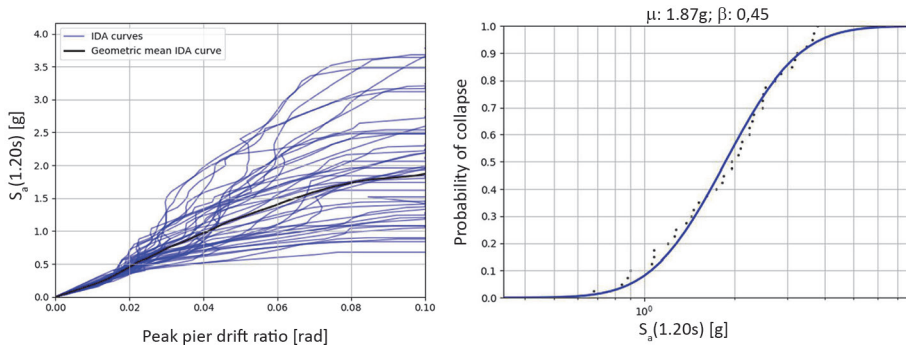
Set IDA krivulja je skup svih IDA krivulja na osnovu provedenih analiza za sve potrebne zapise na jednom modelu (slika 4).

IDA krivulje podloga su za konstruiranje krivulja vjerojatnosti oštećenja. Krivulje vjerojatnosti oštećenja izrađuju se za pojedinačne elemente mosta i za cijeli most. Vjerojatnost oštećenja mosta (engl. bridge system fragility), uvjetovana je vjerojatnošću otkazivanja pojedinih elemenata mosta [16] (otkazivanje stupa kod integralnih mostova, ležajeva kod slobodno oslonjenih mostova, itd.). Konzervativna pretpostavka je serijska povezanost elemenata mosta, a vjerojatnost oštećenja mosta kao cjeline može se prikazati sa dvije granične vrijednosti kao u jednadžbi (3) [16]:

$$\max_{i=1}^n [P(F_i)] \leq P(F_{system}) \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(F_i)] \quad (3)$$

U izrazu (3) F_i predstavlja otkazivanje elementa mosta, a F_{system} otkazivanje mosta kao cjeline.

Lijeva strana jednadžbe predstavlja vjerojatnost otkazivanja sustava koji se sastoji od serijski povezanih elemenata, a desna strana predstavlja otkazivanje sustava koji se sastoji od paralelno povezanih elemenata. Što se tiče mostova, stvarno stanje bi moglo biti negdje između, i ovisno je o više čimbenika (statički sustav, analizirani elementi, robustnost sustava...). Jer, kao što je već napomenuto, rušenje stupa znači i rušenje mosta, ali lom prijelazne naprave, sam po sebi, ne znači i rušenje mosta.



Slika 4. IDA krivulje (lijevo) i pripadne krivulje vjerojatnosti oštećenja (desno) za stup armiranobetonskog mosta [20], gdje Peak Pier Drift Ratio predstavlja relativni pomak vrha stupa u odnosu na dno stupa

4 Zaključak

U radu je prikazana metodologija izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja i dan je kratak osvrt na mostove u Hrvatskoj, uz napomenu da su brojni postojeći mostovi koji su dio važnih prometnih pravaca projektirani i izgrađeni prije stupanja na snagu suvremenih seizmičkih propisa za projektiranje i detaljiziranje. Hrvatska je smještena u seizmički aktivnom području, što je, nažalost, pokazao i nedavni potres u Zagrebu. U radu [21] istaknuto je kako je potres neprihvatljiv rizik za Hrvatsku, te je također naznačen nedostatak istraživanja u području mostova u Hrvatskoj.

U daljnjem istraživanju potrebno je, najprije, sistematizirati bazu podataka postojećih mostova u Hrvatskoj u odnosu na parametre procjene rizika od potresa.

Nakon toga pristupa se provedbi koraka opisanih u ovom radu, a krajnji rezultat biti će krivulje vjerojatnosti oštećenja za određeni tip mosta. Takve bi se krivulje dalje, mogle iskoristiti za cjelokupnu analizu stanja mostova u RH te donošenje odluka o ojačanju mostova za koje analiza pokaže da su osjetljivi na potrese niskog intenziteta (koji bi se definirali uzimajući u obzir vjerojatnosti njihova pojavljivanja tijekom trajanja mosta), ili pak mostova velike važnosti (od kojih moramo zahtijevati više razine pouzdanosti na potresno djelovanje).

Zanimljivo je istaknuti mostove koji su projektirani i građeni od 1970-ih pa do primjene suvremenih propisa (do 2010.), koji su sada predmet sanacija, i gdje bi krivulje vjerojatnosti oštećenja mogle poslužiti kao alat prilikom donošenja odluke da li bi ih trebalo dodatno ojačati s obzirom na potresnu otpornost.

Literatura

- [1] Desroches, R., Padgett, J.E., Ramanathan, K., Dukes, J.: Feasibility Studies for Improving Caltrans' Bridge Fragility Relationships Final Report, State Calif Dep Transp. 2012; 0003(2): 540.
- [2] Avşar, Ö.: Fragility based seismic vulnerability assessment of ordinary highway bridges in Turkey, 2009.
- [3] Simon, J., Vigh, L.G.: Seismic fragility assessment of integral precast multi-span bridges in areas of moderate seismicity, *Bull Earthq Eng.*, 14 (2016) 11, pp. 3125–50.
- [4] Borzi, B., Ceresa, P., Franchin, P., Noto, F., Calvi, G.M., Pinto, P.E.: Seismic vulnerability of the Italian roadway bridge stock, *Earthq Spectra.*, 31 (2015) 4, pp. 2137–61.
- [5] Sextos, A., Kilanitis, I., Kappos, A., Pitsiava, M., Sergiadis, G., Margaritis, V., et al.: Seismic resilience assessment of the Western Macedonia highway network in Greece, *COMPADYN 2017 - Proc 6th Int Conf Comput Methods Struct Dyn Earthq Eng.*, 1 (2017), pp. 1828–42.
- [6] HRN EN 1998-1:2011 + HRN EN 1998-1:2011/NA, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, HZN, Zagreb, Hrvatska.
- [7] HRN EN 1998-2:2011 + HRN EN 1998-2:2011/NA, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 2. dio: Mostovi, HZN, Zagreb, Hrvatska.
- [8] Furundžić, B.: Privremeni tehnički propisi za građenje u seizmičkim područjima PTP-12 (1964), Zbirka tehničkih propisa u građevinarstvu. Beograd: Izdavačko preduzeće Građevinska knjiga, 1969.
- [9] Pravilnik o tehničkim normativima za projektiranje i proračun inženjerskih objekata u seizmički aktivnim područjima. Službeni list SFRJ br.07- 93/96, 1987.
- [10] EN 1998-3: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, Bruxelles: CEN- European Committee for Standardization; 2005.
- [11] Hadzima – Nyarko, M., Nikić, D., Morić D.: Potresno inženjerstvo – procjena oštećljivosti zgrada, Osijek: Grafika d.o.o Osijek; 2018.
- [12] Hrvatske autoceste, monografija, Zagreb: Hrvatske autoceste, HAC; 2007.
- [13] Muntasir Billah, A.H.M., Shahria Alam, M.: Seismic fragility assessment of highway bridges: a state-of-the-art review, [Internet] *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, 11(2015), pp. 804–32. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2014.912243>
- [14] Technical and User's Manual of Advanced Engineering Building Module (AEBM) "Hazus MH 2.1," Fed Emerg Manag Agency, 2015 , pp. 121.

- [15] Mackie, K.R., Stojadinović, B.: Fragility Basis for California Highway Overpass Bridge Seismic Decision Making, 2005.
- [16] Stefanidou, S.P., Kappos, A.J.: Methodology for the development of bridge-specific fragility curves, *Earthq Eng Struct Dyn.*, 46 (2017) 1, pp. 73–93.
- [17] Mandić, A., Radić, J., Šavor, Z.: Ocjenjivanje graničnih stanja postojećih mostova, *Gradjevinar*, 61 (2009) 6, pp. 533–45.
- [18] Franetović, M., Ivanković, A.M., Radić, J.: Seizmičko ocjenjivanje postojećih armiranobetonskih lučnih mostova, *Gradjevinar*, 66 (2014) 8, pp. 691–703.
- [19] Vamvatsikos, D., Allin Cornell, C.: Incremental dynamic analysis, *Earthq Eng Struct Dyn.*, 31 (2002) 3, pp.491–514.
- [20] Oreb, J.: Primjena generiranih potresnih zapisa u procjeni seizmičkog rizika mostova, *Diplomski rad*, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet; 2018.
- [21] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Rizik od potresa za Hrvatsku: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjernicama za budućnost, *Gradjevinar*, 71 (2019), pp. 923–47.

Flexural cracks in fibre-reinforced concrete beams with fibre-reinforced polymer reinforcing bars

Enes Krasniqi¹, Assoc. Prof. Domagoj Damjanović², Prof. Naser Kabashi³

¹University of Prishtina, Faculty of Civil Engineering, enes.krasniqi@uni-pr.edu

²University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, domagoj.damjanovic@grad.unizg.hr

³University of Prishtina, Faculty of Civil Engineering, naser.kabashi@uni-pr.edu

Abstract

There are several reasons why civil and structural engineers may need to use FRP reinforcement (fibre reinforced polymer) in concrete. The primary reason is durability, but other reasons include electro-magnetic neutrality, high strength, and lightweight. The use of fibre-reinforced polymer composites, as replacement for steel reinforcement in concrete structures, is a widespread practice in many countries. The unique characteristic of FRP as a material not susceptible to corrosion makes it particularly suitable in a variety of situations. Due to generally low elastic modulus and poor bond, the use of FRP results in larger crack widths, especially when beams are reinforced with GFRP bars. The aim of this research is to use fibre-reinforced concrete (FRC) in order to reduce crack widths. The paper provides results for 16 beams (three samples per set for GFRP and two samples per set for steel reinforcement) tested under four point bending. Based on the applied methodology, the existing codes are reviewed, compared and modified, so as to enable their calibration in accordance with appropriate results.

Key words: RC beams, GFRP, CFRP, FRC, fibre coefficients, crack width

Pukotine od savijanja u gredama od betona ojačanog vlaknima s armaturnim šipkama od vlaknima ojačanog polimera

Sažetak

Nekoliko je razloga zbog kojih građevinski inženjeri koriste FRP armaturu (polimer ojačan vlaknima - FRP) u betonu. Primarni razlog je trajnost, a ostali razlozi uključuju elektromagnetsku neutralnost, veliku čvrstoću i malu masu. Upotreba polimernih kompozita ojačanih vlaknima kao zamjena čelične armature za betonske konstrukcije široko je rasprostranjena praksa u mnogim zemljama. Jedinstvena karakteristika FRP materijala da nije osjetljiv na pojavu korozije, čini njihovu primjenu posebno prikladnom u različitim situacijama. Zbog općenito malog modula elastičnosti i slabe prionjivosti, upotreba FRP-a rezultira većim širinama pukotina, posebno kod greda ojačanih GFRP šipkama. Tendencija ovih istraživanja je upotreba betona ojačanog vlaknima (FRC) kako bi se smanjile pukotine. Rad uključuje rezultate ispitivanja 16 greda (s GFRP ili čeličnom armaturom) ispitanih savijanjem u četiri točke. Na temelju primijenjene metodologije pregledani su, analizirani i uspoređeni postojeći propisi te su modificirani kako bi se kalibrirali u skladu s odgovarajućim rezultatima.

Cljučne riječi: RC grede, GFRP, CFRP, FRC, koeficijenti vlakana, širina pukotine

1 Introduction

Corrosion is one of the most common causes of deterioration in reinforced concrete structures [1]. The alkaline nature of concrete is of crucial importance for protection of steel reinforcement against aggressive environment, ensuring formation of a passive oxide layer on the surface of reinforcement. Nonetheless, when exposed or when the alkaline environment is neutralized, conventional steel corrodes and leads to spalling of concrete cover [2]. Corrosion may occur when chloride ions penetrate through concrete into reinforcement and cause rupture of the protective oxide layer. Deicing salts (parking lots, highway structures, marine structures) are the major factor of chloride induced corrosion. Current methods of preventing corrosion such as permeability or protection of reinforcing bars, are costly or potentially ineffective in the long run.

The use of fibre reinforced polymer (FRP) as reinforcement in concrete is becoming quite attractive among engineering professionals. FRP could be applied in structures in/or near aggressive environments, in places where good quality concrete can not be achieved, and in slender structural elements. FRP bars are nowadays commercially available and utilized in many countries. A number of recent studies have highlighted the benefits of FRP use as replacement of conventional steel as flexural reinforcement [3]. There are many reasons why engineering community may need to use FRP reinforcement in concrete. Although the primary reason is durability, FRP is also electromagnetically neutral while steel reinforcement can interfere with magnetic field. In addition, the high strength of FRP reinforcement can be utilized to reduce congestion of reinforcement in certain applications. However, compared to conventional steel, most types of FRP bars possess a relatively low elastic modulus and develop a relatively poor bond to concrete. This results in larger crack widths and deflections under service loads compared to beams reinforced with conventional steel bars [4]. Additional disadvantages are related to linear elastic behaviour with no yield [2].

The addition of fibres as micro-reinforcement in composite materials is a well-known concept in various fields of engineering. Fibre Reinforced Concrete may be defined as concrete containing relatively short, discrete, discontinuous fibres that are uniformly distributed and randomly oriented. The fibres tend to bridge the cracks, control crack development, and prevent occurrence of large cracks [5]. This feature of fibres is beneficial for enhancement of low elastic modulus yielding effects on beams reinforced with FRP, in particular those reinforced with GFRP bars [6]. The purpose of this study is also to assess whether the addition of fibres can improve cracking resistance in concrete in terms of stress and strain. The design of beams reinforced with GFRP is typically governed by serviceability requirements (deflection and crack width), which emphasize the bond behaviour of GFRP bar

in concrete as the main parameter in design, because bond controls the cracking behaviour [7, 8]. Beams reinforced with GFRP bars reveal excessive crack widths [9, 10] and, for that purpose, three sets of identical beams (in terms of geometry and bar reinforcement) were tested in order to improve understanding of the fibre addition effect (plain concrete vs FRC). The cracking responses of specimens were studied to clarify improvements that may result from addition of fibres as reinforcement.

1.1 Research Methodology

Several analytical calculations and FEM analysis were first conducted using various approaches in order to define influential areas where main deflection and cracks will appear. This preceded placement of the reference linear variable differential transformer (LVDT) at locations where the main reference crack and maximum deflections occur, as shown in figure below.

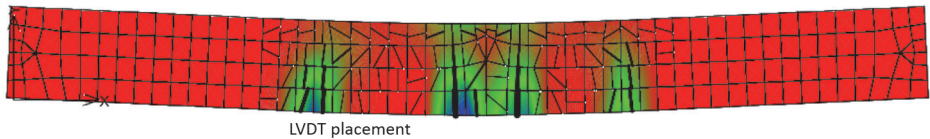


Figure 1. Influential zones as reference for LVDT placements

After curing in laboratory conditions, specimens were carefully placed in the determined frame, where they were subjected to a four-point bending load, as shown in Figure 3 and Figure 8. The tests were performed using the multifunctional console control MCC8, and so several characteristics were recorded for each beam, such as displacement, crack width, deflection, and applied force. The experimental and analytical results were compared and used to define new corrective bond coefficients, which were calibrated using results obtained during experimental investigations. Based on a relatively wide range of bond coefficients for GFRP bars, beams with plain concrete were calibrated in the first step, and the results obtained were used to estimate bond coefficients for FRC, as illustratively presented in Figure 2.

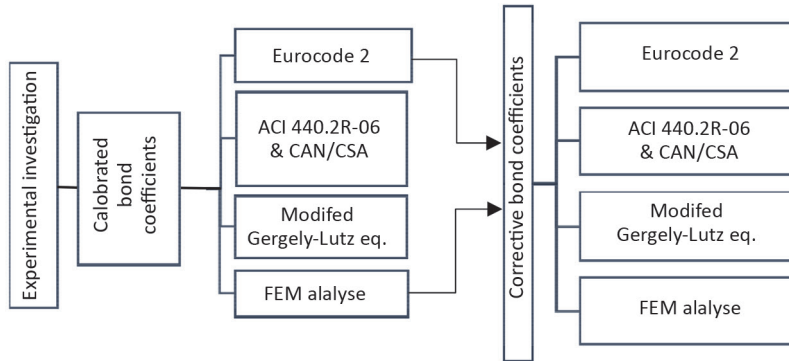


Figure 2. Flowchart with approximation of bond coefficients

2 Experimental campaign

Concrete mix design was prepared with the requested class of concrete C 30/37. The following specimens were cast at the same time: three plain-concrete specimens and six prisms with FRC. The FRC used in this investigation contained micro polypropylene fibres at a volume fraction of 0.063 % or 600 gr/m³. Polypropylene fibres applied in the investigation had a tensile strength of 650 MPa, elastic modulus of 3.5 GPa, and were 12 mm in length. The quantity of fibres was adopted based on manufacturer's recommendations in order to maintain cost-effectiveness of FRC.



Figure 3. Preparation and examination of FRC specimens

The testing was performed according to guidelines given in EN 14651: 2005 using prismatic specimens (150 x 150 x 600 mm). Three-point bending test setup was used, as presented in figures 3 and 4. The specimens were notched at mid span and the notch was 25 mm in height [11].

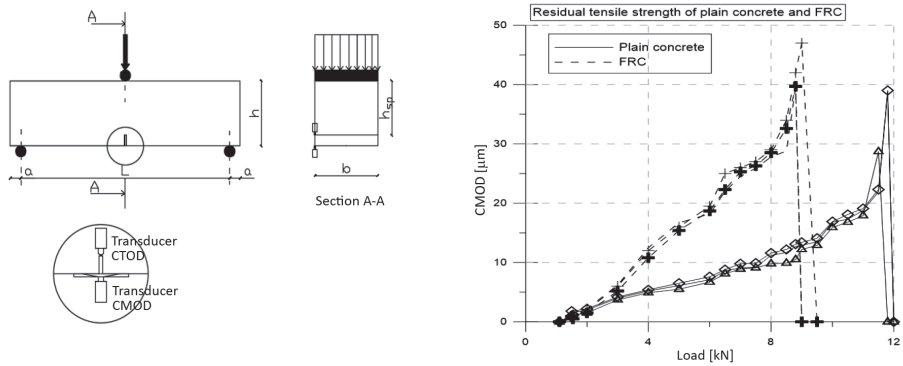


Figure 4. Test setup for flexure test of notched specimens and effects of fibres in relation to load-CMOD

The loading was performed using the displacement control. The method allows measurement of force-displacement respectively force-CMOD (crack mouth opening displacement) relations. Transducers used for CMOD and CTOD measurements were installed on specimens, as shown in Figure 4. During the test, the loading rate was controlled over CMOD.

The GFRP bars were formed using pultrusion methods, and contained glass fibres in a resin matrix. Mechanical properties of GFRP bars were examined based on ASTM D 7205 [12].

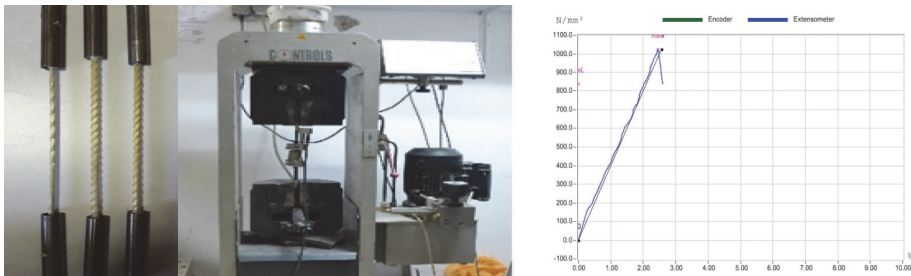


Figure 5. Specimens, testing and determination of mechanical properties of GFRP bars

The edges of bars were embedded inside engraved metallic cylinders in order to avoid constriction or shear stress of the GFRP bars, as shown in Figure 5. Properties of conventional steel were used from known parameters based on the previous research works for S500. FRP bars used in our research were GFRP (helically grooved) bars the mechanical properties of which are presented in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of GFRP and conventional bars

Bar type	Bar size	Elastic modulus [GPa]	Tensile strength [MPa]	Design tensile strength [MPa]	Yield strain [%]	Rupture strain [%]
GFRP	φ6	50.59	1022	731.3	/	1.2
GFRP	φ8	54.3	1108.2	802.7	/	2.34
Steel	φ8	200	500	434.8	2	10

The set of reinforced concrete beams consisted of sixteen specimens (three specimens per set for GFRP and two specimens for conventional steel, as shown in Table 2) with various reinforcement and rectangular cross section, 130 mm in width and 220 mm in height. Each reinforced beam specimen contained two reinforcing bars (φ6 mm or φ8 mm) placed at the bottom, while two identical bars were placed as top reinforcement for each specimen.

Table 2. Test specimens

Specimen	Reinforcement type	Bar size [mm]	Concrete type	Compressive strength [MPa]	Flexural strength [MPa]	Reinforcement ratio ρ [%]	Balanced reinforcement ρ_b [%]
S1G1	GFRP	φ6	Plain	36.6	3.96	0.22	0.50
S2G2	GFRP	φ8	Plain	37.1	3.53	0.40	0.45
S1S1	Steel	φ6	Plain	36.6	3.56	0.22	1.59
S2S2	Steel	φ8	Plain	38.1	3.53	0.4	2.10
S1G1F	GFRP	φ6	FRC	36.6	3.37	0.22	0.50
S2G2F	GFRP	φ8	FRC	37.1	3.47	0.40	0.45

The cross section geometry and the number of reinforcing bars were chosen to represent various reinforcement states (low reinforcement and balanced reinforcement ratio). The specimen geometry, boundary conditions and random reinforcing scheme can be seen in figures 6 and 7.

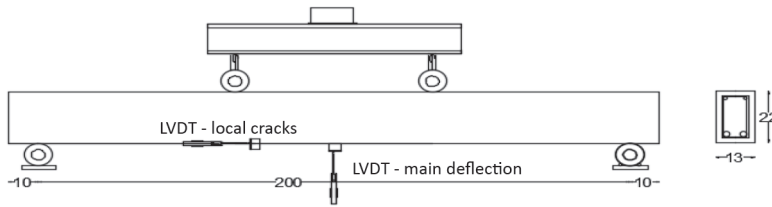


Figure 6. Beam details, instrumentation and geometrical parameters of concrete beams

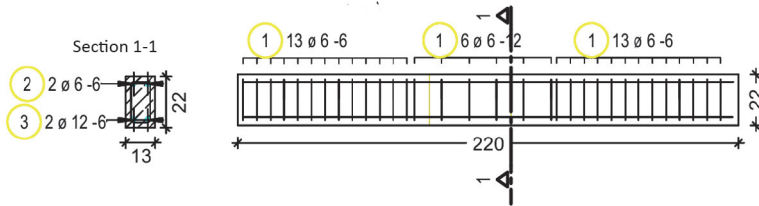


Figure 7. Beam reinforcement scheme

Testing set up for beams is shown in Figure 6, LVDT's were placed in critical positions to enable analysis of cracks and deflections. Thus, one LVDT was positioned on the right side to measure the width of the first flexural crack under concentrated force, while the other was placed in mid span to measure deflection.

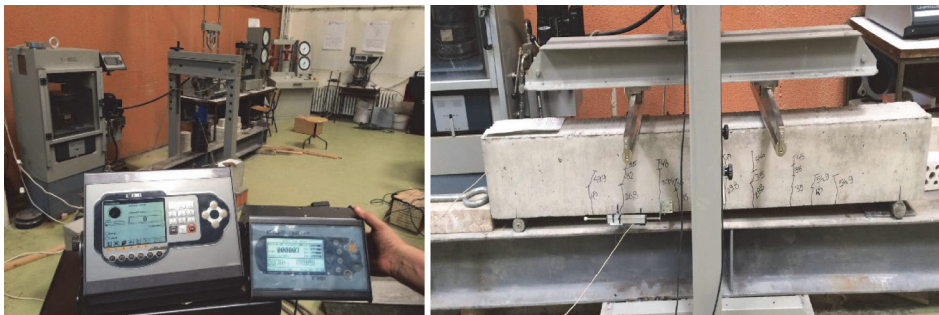


Figure 8. Instrumentation calibration and beam examination

All beam specimens were tested under four-point bending over a mid span of 200 cm (Figure 8). The load was applied using a 200 kN hydraulic actuator with the constant stroke-controlled rate of 200 N/s. The actuator and LVDTs were connected to a data-acquisition unit for continuous recording of the readings.

3 Crack width modelling

3.1 Adhesion coefficients k_b , and k_1 and introduction of fibre coefficients k_s, k_{fb}, k'_{fb} .

The terms k_b , and k_1 are coefficients that account for the degree of bond between the FRP bar and the surrounding concrete. The adhesion coefficient k_b refers to ACI 318 [13] respectively Gergely-Lutz equation, while k_1 is the bond coefficient for crack width calculation according to Eurocode 2 [14]. The average value of k_b was found to range from 0.60 to 1.72 depending on the type of FRP, fibre type, resin, and type of surface treatment, while k_1 ranged from 0.8 to 1.6. [17] Some typical predicted values for GFRP bars, k_b , cited in ACI, ranged between 0.8 and 1.80. However, the ACI Codes and Manuals suggest that designers assume a value of 1.2 for GFRP bars unless more specific information is available for a particular bar. The ACI Committee 440 [15] modified the Gergely-Lutz equation for the use with concrete members by incorporating the effects of different bond and mechanical properties of FRP.

$$w = 2.2 \frac{f_{frp}}{E_{frp}} \cdot \frac{h_2}{h_1} \cdot k_b \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (1)$$

where:

w - crack width

When the stress is represented as a function of moment, the Gergely-Lutz equation can be used to plot the moment versus crack width.

$$w = 2.2 \frac{M}{A_{frp} E_{frp} \cdot j \cdot d} \cdot \frac{h_2}{h_2} \cdot k_b \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (2)$$

Pre-cracking behavior of beams is not linear as suggested in Gergely-Lutz equation, because the crack width began to increase with an increase in moment only at the cracking moment, where the first cracking formed. A modification to the Gergely-Lutz equation was used to include the pre-cracking behavior as a crack form when the tensile strength of concrete is reached [6].

$$w = 2.2 \frac{M - M_{cr}}{A_{frp} E_{frp} \cdot j \cdot d} \cdot \frac{h_2}{h_2} \cdot k_b \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (3)$$

Eurocode 2 crack width equation is strain based and can be adopted directly for the crack width determination of FRP RC elements [18]. The difference in bond characteristics is implemented through coefficient k_1 and for the long term stress via parameter k_t .

$$w = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (4)$$

The strain difference in this expression can be calculated as for an ordinary concrete. However, a new coefficient needs to be introduced in the crack spacing formula where k_s is the additional factor that accounts for the effects of fibres.

$$s_{r,m} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 k_5 \frac{s}{\rho_{p,eff}} \quad (5)$$

Fibre effect coefficients incorporate the ratio of tensile strength f_{ctm} and residual tensile strength $f_{tk,res}$ where calibration values are determined through experimental investigation. Also, fibre coefficients k_{fb} and k'_{fb} were implemented for Gergely-Lutz and modified Gergely-Lutz equation.

$$w = 2.2 \frac{M - M_{cr}}{A_{frp} E_{frp} \cdot j \cdot d} \cdot \frac{h_z}{h_2} \cdot k_b k'_{fb} \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (6)$$

An additional aim of this study is to develop bond models that can accurately predict the response, based on improvement of crack width for GFRP reinforced concrete beams. The ATENA software was used to perform FEM simulations and compare numerical outputs with experiment results; the corresponding bond models were calibrated. A bond model is used to develop behaviour of reinforcement relating to concrete, in the aspect of slip (m) versus bond strength (MPa).

4 Experimental results and discussion

Bond coefficients for beams reinforced with steel bars were close to 1, as expected, because the original Gergely-Lutz equation is based on the steel-concrete relation. A reduction in the bond coefficient means improvement of bond characteristics of the reinforcing bar as compared to steel. Bond characteristics are represented with k_1 in Eurocode 2 and values larger than 0.8 denote worse bond characteristics related to steel. Sets with minimum or balanced GFRP reinforcement (S_1G_1 and S_2G_2) exhibited inferior bond characteristics related to steel.

The corresponding values of bond coefficients versus ratio of applied moment (M) and ultimate moment (M_u) are shown for different phases of loading in Figure 9 where the bond coefficient of modified Gergely-Lutz differs quite clearly. The approximation happens only in the pre-cracking phase, while in the following phases it differs from reference values. An increase in fibre ratio affects the pre-cracking behavior but the ratio taken for this experiment did not achieve the nominal fibre content in order to influence the post-cracking behaviour [19]. Adding small fraction of fibres did not influence the post-crack behavior. On the contrary, few parameters such as volume fraction, fibre length, and modulus of elasticity, tended to improve brittle failure. Fibres on the fracture surface did not bridge the cracks and behaved quite inactively like voids or defects in concrete matrix.

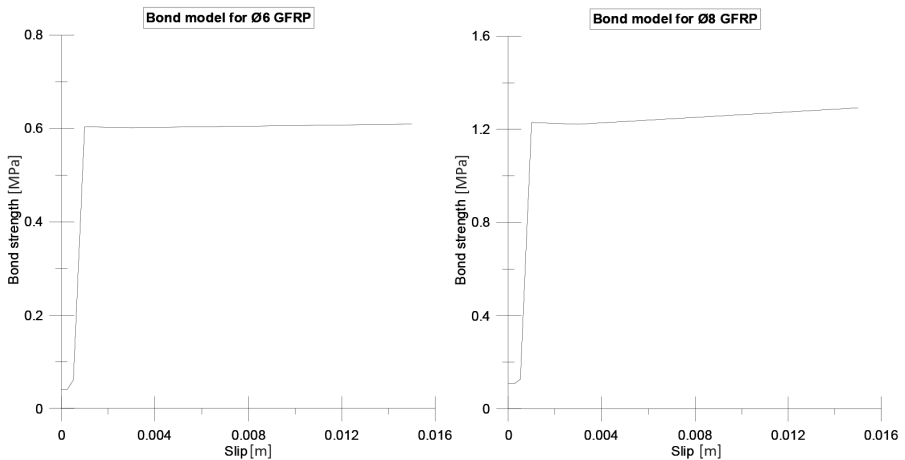


Figure 9. Corrective bond coefficients versus M/M_u

Table 3. Calculated fibre coefficients

SET	Bar type	"SLS" State			(M/M _u – 75 %)		
		Fibre coefficients			Fibre coefficients		
		k_s	k_{fb}	k'_{fb}	k_s	k_{fb}	k'_{fb}
S1G1F	Ø6 GFRP-F	1.2	1.1	1	0.75	0.9	0.85
S1G1F	Ø8 GFRP-F	0.9	0.95	0.85	1	0.9	0.9

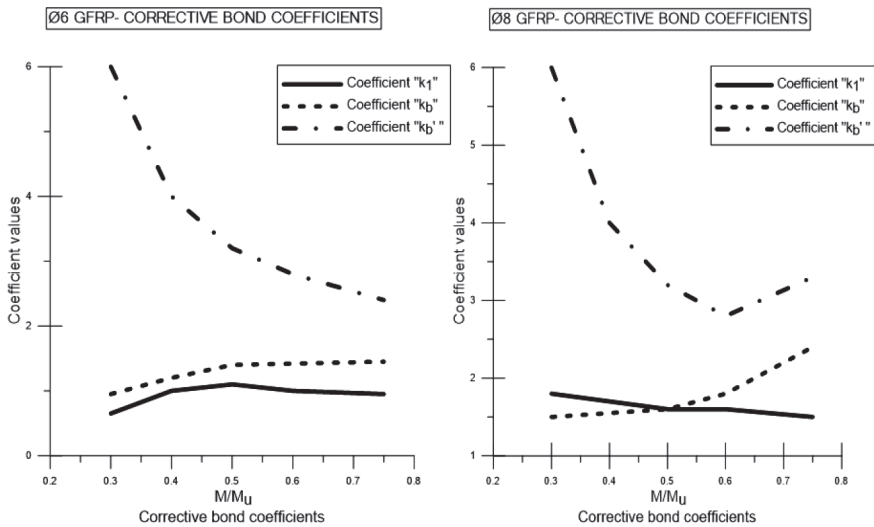


Figure 10. Bond model- beams with Ø6 and Ø8 GFRP reinforcement

Based on experimental results, the corresponding bond models were developed as a function of bond strength and slip, as shown in figure above.

5 Conclusions

The cracking behavior of plain and polypropylene FRC beams with GFRP and reference conventional steel was measured and the following conclusions were drawn from the experimental investigation results:

Beams with balanced reinforcement (7 to 10 % deviation) are in good correlation with reference values of bond coefficients, while beams with minimum reinforcement have shown inferior bond characteristics.

The analytical approach for crack calculation has shown adaptation through bond coefficients, except for the modified Gergely-Lutz equation that has shown compliance in the pre-cracking phase only.

An attempt was made to incorporate through fibre coefficients the effects of fibres with variation of residual tensile strength as yield effect, as shown in Table 4.

The addition of small amount of polypropylene fibres has shown contrary effects, as related to pre-yield cracking behavior.

The effect of fibres can be obtained in the final stage of bearing capacity with symbolic influence (1 % to set S1G1F and 6 % to set S2G2F), as related to reference beams without fibres.

References

- [1] Penttala, V., "Causes and mechanisms of deterioration in reinforced concrete", Failure, Distress and Repair of Concrete Structures, Structures, Woodhead Publishing, pp.3-31. doi:10.1533/9781845697037.1.3.
- [2] Fib Bulletin 40 "FRP reinforcement in RC structures", 2007, pp.31-51.
- [3] Nanni, A., "North American Design Guidelines for Concrete Reinforcement and Strengthening Using FRP: Principles, Applications and Unresolved issues", "Constructions and Building Materials, V.17, No. 6-7, 2003, pp.439-446.
- [4] Houssam Toutanji, Yong Deng "Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods", Construction and Building Materials, Volume 17, Issue 1, 2003, pp. 69-74, doi: 10.1016/S0950-0618(02)00094-6.
- [5] COIN Project report 66-2015 "Structural FRC – Design approach and experimental results" 2015, pp.3-5.
- [6] Lee, K.; Jansen, D.; Berlin, K. et al. "Flexural Cracks in Fibres-Reinforced Concrete Beams with Fibre-Reinforced Polymer Reinforcing Bars" ACI Structural Journal, V. 107, No. 3, May-June 2010.
- [7] CSA-S806-02, Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers" Canadian Standards Association, Ontario, 2002.
- [8] CAN/CSA s6-14, "Canadian Highway Bridge Design," Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, 2014, pp.875
- [9] Kabashi, N., et al., "Flexural Behaviour and Cracks in Concrete Beams Reinforced with GFRP bars," ICPIC 2018, Washington DC, 2018, doi:10 1007/978-3-319-78175-4_79
- [10] Chidananda S. H, Khadiranaikar. R. B.: Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced With GFRP Rebars; International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, Volume 3, Issue 5, 2017
- [11] EN 14651, Test method for metallic fibre concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). European Committee for Standardization, B-1050 Brussels, September 2007
- [12] ASTM D 7205 Standard Test Method for Tensile Properties of Fibre Reinforced Polymer Matrix Composite Bars
- [13] ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete
- [14] Eurocode 2: Design of concrete structures
- [15] 440R-07 Report on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures

- [16] CNR-DT 2032006; Guide for Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fibre-Reinforced Polymer Bars” National Research Council, Rome; Italy, 2006.
- [17] Singh, B. Sh. Analysis and Design of FRP Reinforced Concrete Structures: New Delhi, McGaw-Hill, 2014.
- [18] CEB-FIP Technical report “FRP reinforcement in RC structures” bulletin 40, pp.70.
- [19] Sahith Gali, Kolluru V. L. “Evaluation of crack propagation and Post-cracking Hinge-type Behavior in the Flexural Response of Steel Fibre Reinforced Concrete” , International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.11, No.2, pp.365-375, June 2017
- [20] Zemour, N. et al., “Experimental Study on Splice Strength of Glass Fibre-Reinforced Polymer Reinforcing Bars in Normal and Self-Consolidating Concrete,” ACI Material Journal, V.116, No. 3, May 2019, doi:10.14359/51714459.

Corrosion potential of steel embedded in alkali-activated slag

Antonino Runci¹, Asst. Prof. Marijana Serdar²

¹University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, antonino.runci@grad.unizg.hr

²University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, marijana.serdar@grad.unizg.hr

Abstract

Alkali-Activated Materials (AAMs) are a group of free clinker binders that are based on aluminosilicate powder and an alkali activator. AAMs have shown high performance in many areas and have attracted great interest because of their lower environmental impact compared to ordinary Portland cement. The aim of this paper is to offer a first assessment on the safety of application of AAMs in marine environments, or where de-icing salts are used. The paper focuses on the alkali-activated ground-granulated blast furnace slag in combination with other by-products originating from Southeast Europe. The setup used to evaluate the corrosion behaviour consists of structural steel plates covered with a layer of mortar, and with tap water or a simulated seawater solution. The corrosion behaviour of structural steel plates was monitored by means of the Open Circuit Potential (OCP).

Key words: alkali-activated material, slag, durability, corrosion potential, steel corrosion

Korozijski potencijal čelika ugrađenog u alkalno-aktiviranu zguru

Sažetak

Alkalno aktivirani materijali (AAM) su bezcementna veziva na bazi alumino-silikatnog praha i alkalnog aktivatora. Zbog smanjenog utjecaja na okoliš i visokih uporabnih svojstava, u usporedbi s običnim portlandskim cementom, ovakvi materijali privlače pozornost znanstvenika i industrije. Cilj ovog rada je pružiti prvu procjenu sigurne primjene AAM-a u morskom okolišu ili tamo gdje se koriste soli za odmrzavanje. U radu je korištena alkalno aktivirana granulirana zgura visokih peći u kombinaciji s ostalim industrijskim nusproduktima s područja jugoistočne Europe u svrhu praćenja korozije. Korištena metoda sastoji se od konstrukcijskih čeličnih ploča prekrivenih slojem morta te slojem vode, odnosno slojem simulirane otopine morske vode. Korozijsko ponašanje konstrukcijskih čeličnih ploča praćeno je potencijalom otvorenog kruga (engl. Open Circuit Potential - OCP).

Cljučne riječi: alkalno aktivirani materijal, zgura, trajnost, korozijski potencijal, korozija čelika

1 Introduction

Alkali-activated materials (AAMs) are a group of clinker-free binders that have been developed over the last century. These materials have recently attracted considerable interest due to rapid growth of new urban areas, particularly in developing countries, and the growing demand for materials with low environmental impact. Portland cement production currently account for 8% of global anthropological CO₂ emissions and the growing demand for building materials could increase production from 3.6 billion tons (Gt) to 3.7–5.5 Gt per year [1]. This aspect contrasts with the global trend of decarbonisation, and the commitments made under Paris agreement in 2015.

AAMs represent a valid alternative to Portland cement, since only small amounts of CO₂ are emitted due to the production of alkali activator, which generally accounts for less than 10% of the total binder content. The alkali activators used are usually based on Na or K and can be a liquid solution that is added to precursors together with water during the mixing process, or a solid salt in the one-part system that is premixed with dry precursors [2, 3]. In addition, AAMs are based on aluminosilicate powder that is usually a by-product of other industrial activities such as steel production and/or coal-fired power plants, which reduces the amount of raw material needed for clinker production [3]. Habert et al. [4] have already shown that this type of system is highly efficient in reducing CO₂ emissions compared to OPC, despite some problems related to other outstanding environmental impact categories.

Chemical variability of precursors is the greatest limitation to standardization, and thus to the application of these binders. AAMs can generally be divided into two different categories based on composition of the final phase [3]: (I) low Ca systems - based on activation of a low Ca precursor, such as fly ash or metakaolin, the main reaction product being a three-dimensional gel of the alkali-aluminosilicate hydrate (N-A-S-H) type; and (II) high Ca systems - based on activation of a high Ca precursor, such as blast furnace slag, the main reaction product being a gel of the calcium-aluminosilicate-hydrate (C-A-S-H) type.

The work of RILEM TC 247-DTA [5] has recently shown that the existing standards specified for OPC are also applicable to AAMs. This information is not sufficient to justify the use of AAMs in corrosive environments such as marine environments or environments in which de-icing salts are used, because chloride penetration and subsequent steel corrosion in reinforced concrete is the main cause of early corrosion of steel reinforcement in all countries across the world [6]. Babae and Castel [7] have tested main possible combinations of AAMs with chloride ingress and embedded steel resistance. The results have shown that high Ca systems have a higher resistance to chloride penetration than low Ca systems, as confirmed by RILEM TC

247-DTA [8]. The reasons for the difference in behaviour are not entirely clear, but the basic influence of the gel phases and the hydration product structure has been the most widely accepted theory so far.

In this short paper, the alkali-activated blast furnace slag was tested in combination with other by-products originating from Southeast Europe in the chloride-containing environment. This paper focuses on the corrosion potential (E_{corr}) as the main index of corrosion initiation.

2 Mix design and method

A commercial ground granulated blast furnace slag from Lafarge Holcim was used as the main component of the mix, in combination with other by-products: fly ash class F from Elektroprivreda, silica fume from R-D Silicon D.O.O. (Bosnia & Herzegovina), and iron-silicate fines from Aurubis (Bulgaria). Chemical composition of by-products used in the formulations is shown in Table 1.

Table 1. Chemical composition of by-products in wt.%

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO	SO ₃	P ₂ O ₅
Blast furnace slag	33.46	41.59	12.84	0.73	1.39	0.57	5.97	1.73	0.08	1.65	0.01
Fly ash	13.04	51.1	20.58	7.42	0.89	1.99	2.15	0.53	0.04	1.72	0.54
Silica fume	3.06	92.02	1.68	0.45	0.21	1.11	0.77	0.04	0.03	0.27	0.36
Iron-silicate fine	2.7	27.5	3.5	66.5	0.4	0.9	0.7	0	0	0.7	0

In the present study, precursors were activated with sodium silicate Geosil 34417 from Woellner with $M_s = 1.68$ and NaOH 17.8 M solution or potassium silicate Geosil 14515 from Woellner with $M_s = 1.5$. The aggregate was local dolomite sand with the 0-4 mm grain size. The precursors/aggregate ratio used was 0.3. The mix design is summarized in Table 2.

Table 2. Mortar mix design assessed in this study (in wt%)

Label	Blast furnace slag	Fly ash	Iron-silicate fine	Silica fume	NaOH	Waterglass		Water
						KS _i	NaS _i	
AAS	67.7	0	0	0	5.4	0	4.2	22.7
AASFA	56.8	18.9	0	0	7.2	0	10.4	6.6
AAIS	13.8	0	55.5	0	0	13.8	0	16.6
AASF	53.2	0	0	13.8	9.4	0	15	13.1

The samples were mixed for 9 minutes in total. The dry components were homogenized for 1 minute, the mixtures were mixed for 6 minutes with the addition of the liquid solution, and the mixing was interrupted for 1 minute and was then resumed for another minute.

The steel corrosion over time was monitored by the open circuit potential (OCP). The measurements were performed with an unconventional three-electrode cell (Figure 1) following the example of Šoić et al. [9] using a PAR VMP2 potentiostat/galvanostat. The samples were prepared with a mild steel plate as working electrode simulating reinforcement inside mortar, with a surface area of 4.415 cm² exposed to mortar. Carbon steel plates were polished until an even metallic surface was obtained. A polymer cylinder with silicone was glued onto the steel plate. This cylinder was used as a mould in which the mortar was poured to 2 cm in thickness. After 7 days of curing in sealed conditions, the electrolyte solution was placed in each cell (3 per mixture) on top of mortar; tap water or 0.62 M NaCl solution was used as electrolyte to simulate sea water. A saturated calomel electrode (SCE) was positioned in the solution to serve as reference electrode (Figure 1). The samples were covered with plastic foil to prevent electrolyte evaporation in the time between measurements. The open-circuit potential (OCP) measurement was performed regularly for 15 minutes.

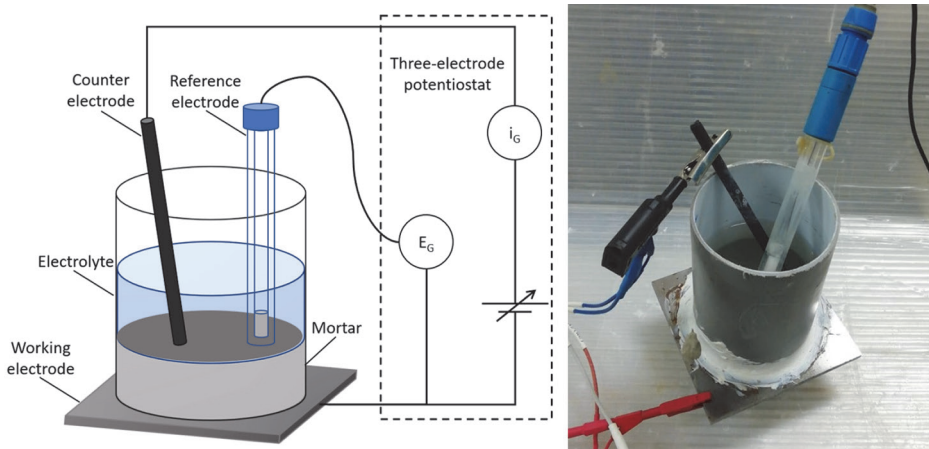


Figure 1. Three-electrode cell set-up

Corrosion potential (E_{corr}) is the most common corrosion index, but it is only a qualitative parameter. The tendency of metal to corrode can be assessed based on corrosion potential, i.e. its change over time. If the OCP is stable or tends towards more positive values, it can be assumed that the passive film around metal is stable in this medium. If the OCP tends towards more negative values, it can be assumed

that the passive film on metal is unstable and that local corrosion will occur or has already occurred. Table 3 shows limit values of corrosion potential and polarization resistance (R_p) used for OPC compared to evolution of steel passive film.

Table 3. Index values of corrosion potential (E_{corr}) and polarization resistivity (R_p) for OPC [10]

Risk of corrosion	E_{corr} [mV]	R_p [$k\Omega \cdot cm^2$]
Passive condition (> 90 % probability of having no corrosion)	$E_{corr} > -200$	$R_p > 250$
Very low-to-moderate corrosion rate	$-200 < E_{corr} < -300$	$25 < R_p < 250$
High corrosion rate (> 90 % probability of having active corrosion)	$E_{corr} < -300$	$R_p < 25$

3 Results and discussion

Potential development in reference and corrosion environments during the 220-day curing time is shown for four mixes in Figure 2.

In all samples except AASF the value of E_{corr} increased during the first 50 days and stayed stable in reference samples exposed to water. In simulated seawater, steel E_{corr} showed a stable trend in AAS until 200 days, when the E_{corr} value started to decrease, probably due to initiation of corrosion. AASFA and AAIS showed a progressive reduction of the potential up to 150 days. after that, the potential values were stable around -600 mV. In contrast, AASF showed a strong reduction of E_{corr} already prior to 50 days of exposure.

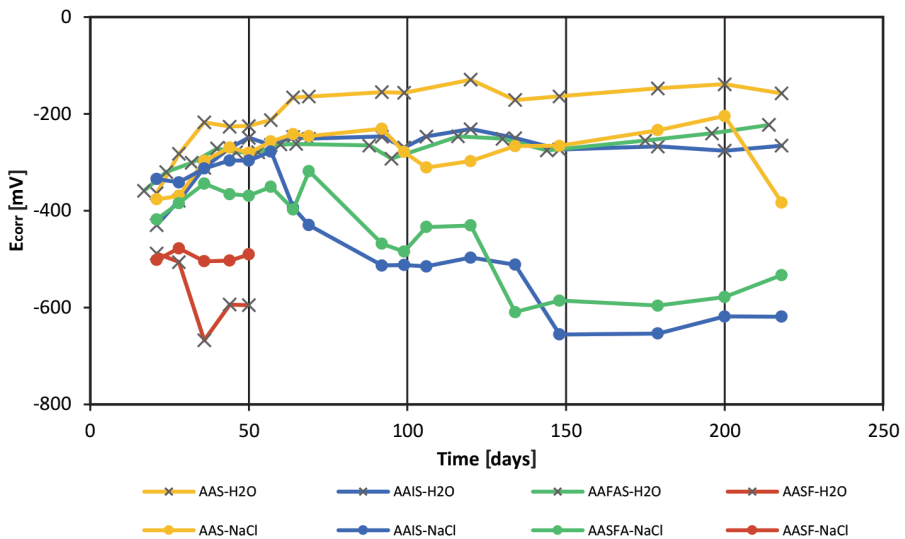


Figure 2. Corrosion Potential (E_{corr}) of mortar in reference water (x) and simulated seawater (•)

The AAMs showed lower potential values than OPC in both corrosive and reference environments (Table 3). This lower value of the corrosion potential could be attributed to oxygen consumption by sulphides in pore solution [7, 11] and Mackinawite precipitates on the steel surface [12]. In the first 50 days the increase of E_{corr} is probably associated with a delay in passive film formation, as already shown by [12]: between 50 and 60 days all mixtures except AASF maintained the passive film formation trend.

The early corrosion of AASFA and AAIS with respect to AAS is probably associated with the porosity effect and the chloride binding capacity (P_{cb}). As has already been shown, low Ca systems have higher porosity and permeability compared to high Ca systems [13, 14]. In addition, chloride ingress is partly hindered by higher binding capacity of high Ca systems due to chloride uptake by hydrotalcite and physical adsorption on C-A-S-H gel and possible precipitation of Friedel's Salts [15, 16]. Due to higher surface of N-A-S-H gel on which chloride is physically adsorbed, the P_{cb} in N-A-S-H is higher than in C-A-S-H. When blast furnace slag is replaced with fly ash, the C-A-S-H/N-A-S-H ratio decreases and the P_{cb} increases, resulting in pH decrease of the pore solution [7, 11]. These can justify faster reduction of corrosion potential for AASFA and AAIS.

In the case of AASF samples, it has been demonstrated that the filler effect of silica fume increases corrosion protection [17]. However, severe cracking on sample surface and detachment of mortar samples from the mould was observed in the case of AASF mix. This severe crack formation can be attributed to drying shrinkage. Due to this crack formation, sea water was in direct contact with structural steel, which prevented formation of passive film. It can therefore be concluded that observed values of potential were very low already after few days of exposure in the case of steel in AASF mix.

4 Conclusion and future prospective

Steel corrosion was monitored for up to 220 days of exposure to a simulated sea water solution. In this paper, steel corrosion is analysed through corrosion potential (E_{corr}). The corrosion potential observed in AAMs was lower compared to that usually registered in OPC. Nevertheless, it pointed to protection of steel surface by passive film formation. Deviations of electrochemical data from the OPC standard have already been established [7, 12], but standardized limits for AAMs still need to be developed. In addition, chemical compositions of precursors represent the greatest limitation to the safe use of AAMs. AAMs have a broad chemical and mineralogical composition. Blast furnace slag showed a high specific resistance to chloride, but systems mixed with fly ash, silica fume and iron-silica fines exhibit a higher corrosion risk. In particular, the lower stability of the AASFA passive layer may be related

to pore structure development: A lower pore refinement than in pure slag systems can influence the resistance [18], but the N-A-S-H influence on the chloride binding capacity is still to be fully understood. AAIS and AASF require further investigation at the compound design stage before moving on to the corrosion study.

The importance of mix design is underlined in the present study. Future research could involve analysis of corrosion rate and electrochemical impedance spectroscopy spectra, with the focus on correlation between electrochemical properties and microstructure of AAMs to validate the influence of porosity and mineralogical evolution on corrosion resistance. Furthermore, the influence of binder matrix and binding capacity on chloride penetration needs to be investigated to explain the difference between different AAMs. Additionally, a critical chloride content needs to be determined to evaluate the influence of compound design on corrosion resistance.

Acknowledgment

Research presented in this paper was performed within the DuRSAAM project, which has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the grant agreement No 813596. The research is also supported by the project "Alternative Binders for Concrete: understanding microstructure to predict durability, ABC", funded by the Croatian Science Foundation under No. UIP-05-2017-4767.

References

- [1] Provis, J.: Green concrete or red herring? - Future of alkali-activated materials, *Advances in Applied Ceramics*, vol. 113, no. 8, pp. 472–477, 2014.
- [2] Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M.: One-part alkali-activated materials: A review, *Cement and Concrete Research*, vol. 103, no. September 2017, pp. 21–34, 2018.
- [3] Provis, J., van Deventer, J. S. J.: *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM, vol. 13. 2014.
- [4] Habert, g., D'Espinose De Lacaillerie, J. B., Roussel, N.: An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends, *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 11, pp. 1229–1238, 2011.
- [5] Provis, J. et al.: RILEM TC 247-DTA round robin test: mix design and reproducibility of compressive strength of alkali-activated concretes, *Materials and Structures*, vol. 52, no. 5, pp. 1–13, 2019.

- [6] Angst, U.: Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 51, no. 1, pp. 1–20, 2018.
- [7] Babaei, M., Castel, A.: Chloride diffusivity, chloride threshold, and corrosion initiation in reinforced alkali-activated mortars: Role of calcium, alkali, and silicate content, *Cement and Concrete Research*, vol. 111, no. May, pp. 56–71, 2018.
- [8] Gluth, G. J. G. et al.: RILEM TC 247-DTA round robin test : carbonation and chloride penetration testing of alkali-activated concretes, *Materials and Structures*, vol. 3, 2020.
- [9] Šoić, I., Martinez, S., Lipošćak, I., Mikšić, B.: Development of method for assessing efficiency of organic corrosion inhibitors in concrete reinforcement, *Gradjevinar*, vol. 70, no. 5, pp. 369–375, 2018.
- [10] American society for testing and materials, “ASTM C 876/09 - Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in concrete.,” *Annual Book for ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials., vol. 91, no. Reapproved 1999, pp. 1–6, 2009.
- [11] Ma, Q., Nanukuttan, S. V., Basheer, P. A. M., Bai, Y., Yang, C.: Chloride transport and the resulting corrosion of steel bars in alkali activated slag concretes, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 9, pp. 3663–3677, 2016.
- [12] Mundra, S., Bernal, S. A., Criado, M., Hlavá, P., Ebell, G., Reinemann, S., Gregor, G. J. G., Provis, J.: Steel corrosion in reinforced alkali activated materials, *RILEM Technical Letters 2*: 33-39, 2017.
- [13] Osio-Norgaard, J., Gevaudan, J. P., Srubar, W. V.: a review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 186, pp. 191–206, 2018.
- [14] Van Deventer, J. S. J., et al.: Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardization, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 4, no. 2, pp. 120–134, 2015.
- [15] Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z.: Chloride binding of alkali-activated slag/fly ash cements, *Construction and Building Materials*, vol. 226, pp. 21–31, 2019.
- [16] Ke, X., Bernal, S. A., Provis, J.: Uptake of chloride and carbonate by Mg-Al and Ca-Al layered double hydroxides in simulated pore solutions of alkali-activated slag cement, *Cement and Concrete Research*, vol. 100, no. October 2016, pp. 1–13, 2017.
- [17] Rostami, M., Behfarnia, K.: The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 262–268, 2017.
- [18] Ma, Y., Wang, G., Ye, G., Hu, J.: A comparative study on the pore structure of alkali-activated fly ash evaluated by mercury intrusion porosimetry, N₂ adsorption and image analysis, *Journal of Materials Science*, vol. 53, no. 8, pp. 5958–5972, 2018.

Condition assessment of concrete structures using ground penetrating radar (GPR)

Ksenija Tešić¹, Asst. Prof. Ana Baričević², Asst. Prof. Marijana Serdar³

¹University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, ksenija.tesic@grad.unizg.hr

²University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, ana.baricevic@grad.unizg.hr

³University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, marijana.serdar@grad.unizg.hr

Abstract

Maintenance costs of concrete structures can be reduced by efficient and extensive condition assessment. Rapid technological development has allowed application of innovative methodologies for the inspection of structures, which has in turn increased precision and efficiency of inspection activities. Potential for using ground-penetrating radar in the assessment of concrete structures has been considered for a long time and, with the improvement of the analysis tools, its application has been constantly increasing. Ground-penetrating radar is a technique based on emission of electromagnetic waves into the material, and on analysis of reflected waves, resulting in information about location and properties of a particular object. GPR is used for assessing condition of concrete structures, i.e. for the localization of reinforcement, determination of concrete cover, and localization of delamination. Recent research has shown that GPR data could be used for assessing corrosion of reinforcement. Following literature results on GPR-based study of concrete condition, main principles of GPR use are outlined in the paper.

Key words: ground-penetrating radar, condition assessment of concrete structures, corrosion of reinforcement

Primjena georadara u ocjeni stanja betonskih konstrukcija

Sažetak

Provođenje pravovremene, učinkovite i sveobuhvatne ocjene stanja građevinskih konstrukcija može utjecati na niže troškove održavanja konstrukcije. Ubrzani tehnološki razvoj omogućuje primjenu inovativnih metodologija u ocjeni stanja konstrukcija, što zauzvrat osigurava preciznost i učinkovitost inspekcije. Potencijal georadara u ispitivanju betonskih konstrukcija istražuje se već duže vrijeme, a od tada njegova primjena u raznim vrstama ispitivanja raste, uz kontinuirano poboljšanje analize rezultata. Georadar je uređaj čiji se rad temelji na emisiji elektromagnetskih valova u materijal nakon čega analiza reflektiranih valova daje željene podatke o položaju i karakteristikama objekta od koji se val reflektirao. U svrhu ispitivanja betonskih konstrukcija, georadar se koristi za lociranje armature, određivanje debljine zaštitnog sloja i pronalaženje delaminacija. Istraživanja su pokazala da se podaci prikupljeni georadarom mogu koristiti za procjenu korozije armature. U ovom radu predstavljen je osnovni princip rada georadara, nakon čega su predstavljeni rezultati istraživanja iz dostupne literature ocjene stanja betona pomoću georadara.

Ključne riječi: georadar, ocjena stanja betonskih konstrukcija, korozija armature

1 Introduction

Condition assessment is an important part of maintenance of concrete structures as it can efficiently minimise consequences of their degradation. Damage caused by degradation process is primarily assessed by visual inspection, during which defects such as cracking, rust staining, or water leakage, can be detected [1]. However, visual signs can in most cases be detected at an advanced phase of deterioration process only. Early detection of deterioration is therefore important for extending service life of concrete structures. Non-destructive methods have an important role in assessing condition of concrete structures. Main advantages of these methods over destructive testing methods are lower costs, reduced testing time, and no physical damage to structures [2, 3].

Ground-penetrating radar (GPR) is a technique initially designed for military use to locate buried objects [1]. With improvement of this device, the field of its application has expanded to various disciplines, including civil engineering, hydrogeology, archaeology, etc. [4, 5]. In civil engineering, GPR has been used in numerous applications as a non-destructive technique. For instance, it is used for localization of reinforcement, tendon duct mapping, localization of delamination, detection of voids, and determination of concrete cover thickness [1, 4, 6, 7]. Combined with other non-destructive methods, it enables faster and more efficient evaluation of the condition of concrete structures [8, 9]. Several investigations have shown that GPR data could be used for identifying corrosion of steel in reinforced concrete specimens [1, 7, 10–12]. This novel approach for the evaluation of corrosion could prove to be quite convenient because it does not require any connection to reinforcement. This paper is organized in two parts. Fundamental design of GPR, and an overview of main effects influencing propagation of GPR signal, are presented in the first part. The second part offers a review of experimental investigations conducted so far for assessing condition via GPR measurements.

2 Ground-Penetrating Radar (GPR)

2.1 GPR setup

Ground-penetrating radar is designed to emit via transmitter electromagnetic waves into the material, and the waves are then reflected by the target and detected by the receiver, as shown in Figure 1 [4].

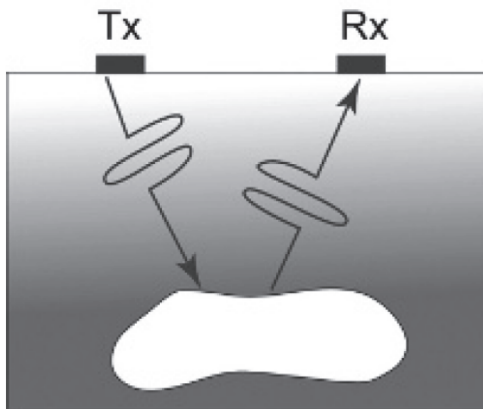


Figure 1. Ground-Penetrating Radar principle [4]

The depth of wave penetration is influenced by the antenna frequency. High-frequency antennas can detect objects with high resolution, but their penetration depth is smaller. On the other hand, radars with low frequency transmit waves to greater depths, albeit to the detriment of resolution [1, 13]. Their utilization for the detection of smaller defects in concrete is therefore questionable.

The reflection of an electromagnetic wave occurs at the interface between two different materials or, more precisely, at points where there is a difference in dielectric properties. The strength of the reflected wave depends on the contrast between dielectric constants of the materials; greater contrast means that the absolute value of the reflected wave amplitude will be higher. The reflection intensity can be described with the reflection coefficient, r :

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_{R1}} - \sqrt{\epsilon_{R2}}}{\sqrt{\epsilon_{R1}} + \sqrt{\epsilon_{R2}}}$$

where ϵ_{R1} and ϵ_{R2} are relative dielectric constants of the upper and lower material [3]. The fact that steel is an almost perfect reflector [14] is used for locating reinforcement in concrete structures.

The results of GPR survey are usually presented in form of the A-scan, B-scan or radargram, and C-scan [1]. The A-scan or trace is a one-dimensional representation of wave propagation through the medium (Figure 2b). Time measurement is given on the horizontal axis and wave amplitude is recorded on the vertical axis. For a ground-coupled antenna, when a wave is emitted, the receiver first records a direct wave that propagates through the air from the transmitter to the receiver. Then a part of the electromagnetic wave is reflected at the surface of the material. These

two components are called the direct wave (DW). The rest of the wave energy penetrates through the material until it reaches the material with different dielectric properties. The electromagnetic wave then reflects, and the receiver records it as a reflected wave (RW) (Figure 2).

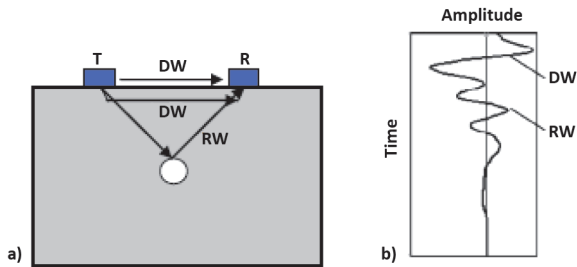


Figure 2. a) Paths of GPR signal; b) A-scan [1]

When antennas are moved in one direction, GPR data can be given as a B-scan or radargram (Figure 3a). If a survey is carried out in two directions, which is usually done by making a grid, a three-dimensional representation can be obtained (Figure 3b).

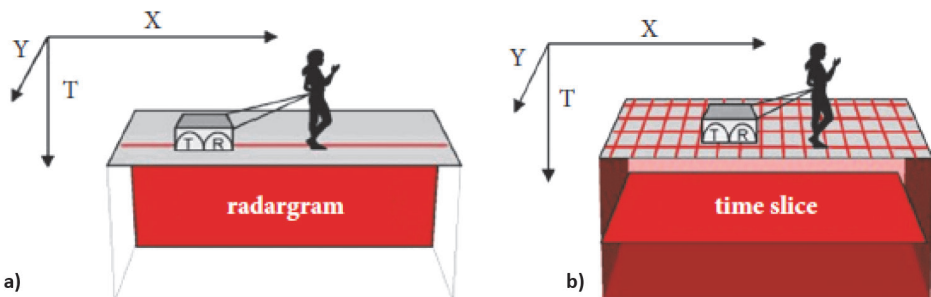


Figure 3. a) B-scan or radargram; b) C-scan [11]

If the reflected wave travel time from the transmitter to the receiver is known, and if the velocity of the wave, depending on dielectric properties of the material, is also known, then the depth of the object can be estimated.

2.2 Propagation of electromagnetic waves

The energy of electromagnetic waves reduces during their propagation, which is firstly caused by geometrical propagation of waves and, secondly, because waves travel through material [13]. The exposure of concrete to an electromagnetic field

causes changes on the microscopic level [15], which results in wave attenuation. The attenuation depends on dielectric properties of the material, permittivity and conductivity, and these properties are highly influenced by moisture content and content of chloride ions dissolved in concrete pores [1, 13]. An increase in the moisture and chloride content causes an increase in dielectric properties of concrete [16] and decrease in the reflected wave amplitude.

3 Condition assessment using GPR data

Previous research [1, 7, 10–12, 17] has revealed that GPR data can be utilized for the assessment of reinforcement corrosion, as well as for the estimation of moisture and chloride content. The research performed so far shows that changes in travel time, wave amplitudes and frequencies, as derived from A-scans, can reveal deterioration processes in concrete structures, and also locate corroded areas within reinforcement.

3.1 Corrosion of reinforcement

Corrosion of steel in concrete is an electrochemical mechanism [18] that can be manifested in concrete structures in various forms. The most common forms of corrosion in concrete are general corrosion and pitting corrosion [19]. General corrosion is induced by decrease in pH value of concrete caused by carbonation of concrete or chloride penetration through concrete cover, which leads to degradation of the passive film of steel [18, 19]. Pitting corrosion happens when the passive film of steel is locally destroyed, usually induced by high chloride contamination from seawater and deicing salts [19]. The reinforcement surface devoid of passive film is a convenient environment for the occurrence of corrosion. The volume of corrosion products is higher than that of pure iron [19] and it results in the appearance of cracks. The formation of corrosion products at the interface between concrete and reinforcement causes amplitude change of the reflected wave, and this change can be noted with GPR [7]. Traditional method for assessing corrosion risk is the half-cell potential (HCP) method [18], but its main drawback is the necessity to make connection with the rebar. Therefore, some current investigations are aimed at replacing the HCP method with GPR.

3.2 Effect of moisture and chloride content on GPR data

Sbartai et al. [17] emphasized the influence of water and chloride content in concrete on GPR data. Their research pointed to the dominant influence of moisture content on the attenuation of direct and reflected waves. The increased chloride content caused further wave attenuation, and reflected waves showed higher sen-

sitivity than direct waves. Research performed by Hong [1] confirmed that an increased moisture content causes delayed travel time of reflected waves, and decrease in amplitude and peak frequency of direct and reflected waves. This is closely related to the dielectric permittivity of concrete and the velocity of the GPR signal, leading to greater attenuation. In experimental examination [10] where different exposure conditions were simulated by immersing corroded rebars in three different water oil emulsions, the emulsions with higher dielectric permittivity ensured an increase in travel time of reflected waves and decrease in amplitude. Similar observations about the relation between dielectric permittivity and signal attributes were made by other authors [7, 20].

3.3 Effect of reinforcement corrosion on GPR data

One of the first studies to have acknowledged GPR potential for corrosion detection was published by Hubbard et al. in 2003 [12]. Their results show that corrosion influences decrease in spectral amplitude. However, the authors point to the significance of the effect of moisture on the GPR wave behaviour. However, the authors point to the significance of the effect of moisture on the GPR wave behaviour which is not excluded in this experiment. Hong [1] showed that the advancement of corrosion process is related to the growth in amplitudes of reflected waves and decrease in travel time. This was also concluded in [7], and this phenomenon was attributed to the presence of corrosion products in concrete cover. Corrosion products made larger interfaces (corrosion products, concrete, steel, cracks) which affected reflected waves. The increase in wave amplitude with corrosion progress is also revealed in [21, 22]. On the contrary, lower amplitude in corrosion process, resulting from increased chloride content and presence of corrosion products, is reported in [11]. It seems that in this paper the influence of corrosion products is not clearly distinguished from the effect of chlorides in wave reflection and, consequently, the results can only be attributed to the concurrent action of both effects.

3.4 Corrosion assessment in-situ

The above mentioned studies were performed in controlled laboratory conditions where different parameters can be controlled. However, it is hard to perceive corrosion in-situ without raised moisture or chloride content. Therefore, various approaches have been applied to assess condition of concrete structures, and in many of them attempts have been made to predict probability of corrosion according to the areas with high attenuation, caused by high moisture and chloride content [23]. Special efforts have been made to establish a relation between results obtained with HCP and GPR methods. In [24], a comparison was made at nine bridge decks between GPR signal attenuation areas and results acquired by the half-cell potential method. The attenuation was used to predict deteriorated areas and a good

agreement was established between these two methods. Regardless of concrete condition, the amplitude attenuation depends on concrete cover, and so Barnes et al. [23] revealed the depth correction for the reflected amplitude, and the resulted amplitude was then correlated only with dielectric properties of concrete cover. Martino et al. [25] went a step further and used the ROC (Receiver Operating Characteristic) curve to determine the threshold value for the rebar reflection amplitude, which distinguishes corroded from healthy areas, and a high accuracy between HCP and GPR method was established. Also, the attenuation of the GPR signal was used to monitor the progress of deterioration at the concrete bridge deck by comparing results from various surveys conducted over two years [26]. The attenuation map was compared with the map of electrical resistivity of concrete, and the authors attributed strong correlation between these methods to the fact that both of them are primarily subordinated to the electrical conductivity of concrete. Besides, the GPR results were used for assessing the overall condition of concrete decks by calculating the GPR condition index (CI), which is the indicator of the level of deterioration [27]. It can be combined with other condition indices obtained with other NDE methodologies for assessing condition of bridge decks [28]. As an example, the GPR condition map obtained with the robotic survey is shown below.

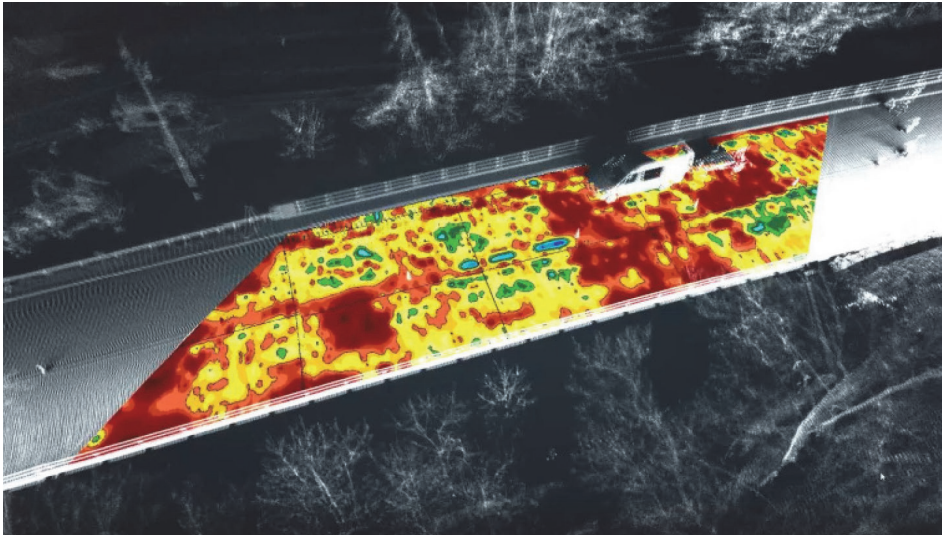


Figure 4. GPR condition map [28]

4 Conclusion

Based on the above-presented brief review of previous studies, where observations about the relationship between the GPR data and condition of concrete are given, the following conclusions can be made:

- The presence of moisture and chlorides in concrete induces wave attenuation and time delay, and is caused by the changes in dielectric properties.
- The review of laboratory examinations, where the effect of corrosion was considered, does not clearly highlight the effect of corrosion on wave amplitude; some authors argue that corrosion results in a decrease in amplitude of reflected wave because of higher permittivity of concrete cover contaminated by corrosion products, while others identify the higher interface between concrete and rust with stronger wave reflection. However, it is difficult to fully compare results of various examinations because reinforcement corrosion has been accelerated by different methods.
- The attenuation of GPR signal is a possible sign of deterioration of an existing concrete structure.

As a non-destructive method, GPR could be very useful for condition assessment of concrete structures thanks to its mobility and efficiency. Nevertheless, it has some limitations. GPR data cannot provide information on corrosion stage; the attenuation of GPR signal can only point to the possibility of corrosion. Overall, its most suitable application would be for monitoring concrete structures. Variations between consecutive surveys could reveal the progress of deterioration process. In such a way, combined with the engineer's experience, the early detection of corrosion could be possible. Despite this, appropriate analysis and presentation of GPR data are not possible without deep understanding of its complexity. It is evident that GPR data are dependent on many factors, moisture and chlorides, stage of corrosion, rebar depth, surface roughness, etc. Thus, every influencing factor must be considered to provide for a reliable interpretation of the GPR signal and make claims about condition of structures.

Acknowledgement

This research is a part of scientific project "Autonomous System for Assessment and Prediction of Infrastructure Integrity (ASAP)", financed by the European Union through the European Regional Development Fund - the Competitiveness and Cohesion Operational Programme (KK.01.1.1.04.0041).

References

- [1] Hong, S.: GPR-Based Periodic Monitoring of Reinforcement Corrosion in Chloride-Contaminated Concrete, PhD dissertation, Berlin, Berlin Institute of Technology, 2015.
- [2] Pfändler, P., Bodie, K., Angst, U., Siegwart, R.: Flying corrosion inspection robot for corrosion monitoring of civil structures – First results, Fifth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2019), Potsdam, 2019.
- [3] International Atomic Energy Agency: Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17, Vienna, 2012.
- [4] Annan, A.P.: Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar, Ground Penetrating Radar: Theory and Application, (ed. Jol, M.H.), Elsevier Science Publishers Ltd., London and Amsterdam, pp. 3-37, 2009.
- [5] Daniels, D.J.: Introduction (Chapter 1), Ground Penetrating Radar 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, London, pp. 1-11, 2004.
- [6] Pajewski, L., Benedetto, A., Derobert, X., Giannopoulos, A., Loizos, A., Manacorda, G., et al.: Applications of Ground Penetrating Radar in Civil Engineering – COST Action TU1208, 7th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2013), Nantes, pp. 3-9, 2013.
- [7] Lai, W., Kind, T., Stoppel M., Wiggenhauser, H.: Measurement of Accelerated Steel Corrosion in Concrete Using Ground-Penetrating Radar and a Modified Half-Cell Potential Method, Journal of Infrastructure Systems 19 (2013) December, pp. 205-220.
- [8] Gucunski, N., Maher, A., Basily, B., La, H., Lim, R., Parvardeh, H., Kee, S.H.: Robotic Platform RABIT for Condition Assessment of Concrete Bridge Decks Using Multiple NDE Technologies, HDKBR info 3 (2013) 4, pp. 5-12.
- [9] Reichling, K., Raupach, M., Wiggenhauser, H., Stoppel, M., Dobmann, G., Kurz, J.: BETOSCAN – Robot controlled non-destructive diagnosis of reinforced concrete decks, 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering, Nantes, 2009.
- [10] Hasan, M.I., Yazdani, N.: An experimental study for quantitative estimation of rebar corrosion in concrete using ground penetrating radar, Journal of Engineering (United States) 2016 (2016).
- [11] Zaki, A., Johari, M.A.M., Hussin, W.M.A.W., Jusman, Y.: Experimental Assessment of Rebar Corrosion in Concrete Slab Using Ground Penetrating Radar (GPR), International Journal of Corrosion 2018 (2018).
- [12] Hubbard, S.S., Zhang, J., Monteiro, P.J.M., Peterson, J.E., Rubin, Y.: Experimental Detection of Reinforcing Bar Corrosion Using Nondestructive Geophysical Techniques, ACI Materials Journal 100 (2003) 6, pp. 501-510.

- [13] Dinh, K., Gucunski, N., Kim, J., Duong, T.H.: Understanding depth-amplitude effects in assessment of GPR data from concrete bridge decks, *NDT&E International* 83 (2016), pp. 48-58.
- [14] Ma, X., Liu, H., Wang, M.L., Birken, R.: Automatic detection of steel rebar in bridge decks from ground penetrating radar data, *Journal of Applied Geophysics* 158 (2018) November, pp. 93–102.
- [15] Jamil, M., Hassan, M.K., Al-Mattarneh, H.M.A., Zain, M.F.M.: Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques, *Materials and Structures* 46 (2013), pp. 77–87.
- [16] Hong, S., Lai, W.W.L., Wilsch, G., Helmerich, R., Helmerich, R., Günther, T., et al.: Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR, *Construction and Building Materials* 66 (2014), pp. 671–684.
- [17] Sbartai, Z.M., Laurens, S., Balayssac, J., Arliguie, G., Ballivy, G.: Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures, *NDT&E International* 39 (2006), pp. 400–407.
- [18] Elsener, B., Andrade, C., Gulikers, J., Polder, R., Raupach, M.: Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures, *Materials and Structures* 36 (2003) August-September, pp. 461–471.
- [19] Poursaee, A.: *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, (ed. Poursaee, A.), Woodhead Publishing, London and Amsterdam , pp. 19–33, 2016.
- [20] Solla, M., Lagüela, S., Fernández, N., Garrido, I.: Assessing rebar corrosion through the combination of nondestructive GPR and IRT methodologies, *Remote Sensing* 11 (2019).
- [21] Zhan, B.J., Lai, W.L., Kou, S.C., Poon, C.S., Tsang, W.F.: Correlation between accelerated steel corrosion in concrete and ground penetrating radar parameters, *International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering*, Hong Kong, pp. 563–571, 2011.
- [22] Raju, R.K., Hasan, M.I., Yazdani, N.: Quantitative relationship involving reinforcing bar corrosion and ground-penetrating radar amplitude, *ACI Materials Journal* 115 (2018) 3, pp. 449–458.
- [23] Barnes, C.L., Trottier, J.F., Forgeron, D.: Improved concrete bridge deck evaluation using GPR by accounting for signal depth-amplitude effects, *NDT&E International* 41 (2008) 6, pp. 427–433.
- [24] Barnes, C.L., Trottier, J.F.: Ground-Penetrating Radar for Network-Level Concrete Deck Repair Management, *Journal of Transportation Engineering* 126 (2000) May/June, pp. 257–262.

- [25] Martino, N., Maser, K., Birken, R., Wang, M.: Determining ground penetrating radar amplitude thresholds for the corrosion state of reinforced concrete bridge decks, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 19 (2014) 3, pp. 175–181.
- [26] Gucunski, N., Parvardeh, H., Romero, F., Pailles, B.M.: Deterioration progression monitoring in concrete bridge decks using periodical NDE surveys, 2nd Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2013), Istanbul, 2013.
- [27] Gucunski, N., Basily, B., Kim, J., Yi, J., Duong, T., Dinh, K., et al.: RABIT: implementation, performance validation and integration with other robotic platforms for improved management of bridge decks, *International Journal of Intelligent Robotics and Applications* 1 (2017) 3, pp. 271–286.
- [28] Gucunski, N., Kim, J., Dinh, K., Gong, J., Liu, F.: Innovative Ways In Condition Assessment Of Concrete Bridge Decks : Data Collection Using Robotics, and Advanced Data Interpretation And Visualization, SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Funchal, 2018.

Cost-optimal thermal transmittance and energy performance of residential buildings in various cities in Kosovo

Arta Sylejmani¹, Asst. Prof. Bojan Milovanovic²

¹Municipality of Prishtina, selimiarta@gmail.com

²University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, bojan.milovanovic@grad.unizg.hr

Abstract

In 2018, Kosovo approved two regulations that provide information on minimum requirements for calculating energy performance of buildings, and on methodology for calculating such performance. The aim of this paper is to clarify the thermal transmittance (U-values) according to local legislation, through a building model, and to find optimal U-values by simulating more than 540 combinations of building materials in five cities in the country which, as officially stated in its regulations, has one climate zone only. The modelling and simulation were conducted using the ARCHICAD software and the EcoDesigner Star add-on.

Key words: heating and cooling energy demand, cost-optimal levels, building energy performance, residential building, dynamic simulation

Optimalni troškovi energetska učinkovitost stambenih zgrada u različitim gradovima na Kosovu

Sažetak

Kosovo je u 2018 odobrilo dva propisa koja pružaju informacije o postizanju minimalnih zahtjeva za izračunavanje energetske učinkovitosti u zgradama i metodologiji njenog izračuna. Fokus ovog rada je razjašnjenje toplinske propustljivosti (U-vrijednosti) prema lokalnom zakonodavstvu, pomoću građevinskog modela, te pronalaženje optimalnih U-vrijednosti simuliranjem više od 540 kombinacija građevinskih materijala, u pet gradova u zemlji koja u uredbama službeno ima samo jednu klimatsku zonu. Modeliranje i simulacija provedena je pomoću ARCHICAD alata i dodatka EcoDesigner Star.

Ključne riječi: potrošnja energije na grijanju i hlađenju, optimalni troškovi, energetska učinkovitost zgrade, stambena zgrada, dinamička simulacija

1 Introduction

The Energy Performance of Buildings Directive (2010/31/EU) [1] requires definition of mechanisms for the regulation and reduction of energy consumption in buildings, including their certification. Even though Kosovo was not part of the European Union at the end of 2018, it has strengthened two regulations [2, 3] that partly correspond to this directive of the European Parliament. Based on [4], the energy demand of the residential building stock in Kosovo amounts to approximately 62 % of the total electricity consumption and, compared to the same period in 2019, the amount of electricity consumed has increased by 6.4 %. The fact that the municipality of Prishtina has considerable needs with regard to heating is also emphasized by Ahmeti et al. [5]. The results show that the daily heating energy consumption demand exceeds current production capacities. Heating demand data for other cities in Kosovo can be found in [6]. Faced with high demand and consumption of electricity, Kosovo seeks to strengthen relevant regulations to achieve the minimum required energy consumption and thermal comfort in buildings at optimum cost, based both on European legislation and climate conditions prevailing in the country. Although the two above-mentioned documents define maximum allowed values of thermal transmittance (U-values) for constituent elements of buildings, their application is still unenforceable. In the absence of relevant software, national calculation methodology for energy demand requirements in buildings is also inapplicable. According to [2, 3], these U-values are determined through the cost-optimal method but, until now, we do not have an official document with parameters to be used for these calculations. In recent decades, many studies have been undertaken to define the cost-optimal level in order to determine energy demands in buildings. Corgnati et al. [7] presented a general methodology for the creation of baseline buildings. They analysed an office building as a case study and then proposed new measures for simulation. In this respect, they created four types of buildings and each building was included in calculations that were conducted in three cities in Italy. In conclusion, twelve models were presented in the dynamic energy simulation for a cost-optimal energy analysis. Based on computer simulation, Ferrara et al. [8] established the cost-optimal level for the typology of a French building involving a single family house. Furthermore, they studied the French market and found that a cost function was created for each parameter, and the global cost methodology was adopted as an objective function for optimization. The optimization and cost-optimal methodologies in buildings are also considered in [9-11]. The cost effectiveness of energy renovation also depends on the existing envelope of the building. The return on investment is longer for buildings with higher quality of envelope compared to lower quality buildings. Bajraktari et al. [12] investigat-

ed the household sector in Kosovo by addressing the issue of energy efficiency and identifying the cost-optimal solution for typical masonry houses. The results show that the 20 to 30 year return on investment for renovation is cost-effective when targeting renovation of the building envelope at an average value of ~ 0.2 W/m²K for the case of an existing single family masonry building.

It seems that all studies [5-12] aim to find the necessary energy demand, with the same or increased thermal comfort, through a cost-optimal procedure. Considering these studies, this research aims to compare the energy characteristics of model houses located in five cities of Kosovo in the same climate zone. The cost-optimal level and global cost analysis are determined through dynamic simulations of energy performance. Based on the EU regulation No 244/2012, cost-optimal U-values are analysed and compared with U-values according to [2, 3] in order to verify whether these parameters are achievable or whether they should be reviewed for current legislation.

2 Case Study: building characteristics, climatic conditions and energy evaluation

A typical local house was adopted by the design studio ArchiEDU [13] as a model for calculating physical parameters related to the heating and cooling energy demand. The baseline building contains information about the building geometry and materials currently used by Kosovar builders. This single-family house has two-storeys and a basement. It occupies a gross floor area of 267.29 m². The envelope of the existing building consists of autoclaved aerated concrete (25 cm). Approximately 43 % of the windows have the opening facing the south, while 10 % are oriented toward other directions. The window area occupies approximately 1/3 of the gross floor area. The insulation thickness at exterior walls is 9 cm, it is 8 cm on the roof, and 7 cm at the basement floor. The windows have double glazing and the space between panes is filled with argon (U_g-value is 1.5). These structural and functional parameters are in line with the legislation currently in force in Kosovo [14]. So, the baseline building or maximum U-values, were set to U_{WALL}: 0.35, U_{ROOF}: 0.3, U_{GLAZING}: 1.5, U_{FLOOR}: 0.3 [2, 3], while other 108 proposed U-value combinations were generated by combining the following U-values: U_{WALL} (0.15, 0.2, 0.35, 0.5), U_{ROOF} (0.15, 0.2, 0.3), U_{GLAZING} (0.6, 1.1, 1.5) and U_{FLOOR} (0.15, 0.2, 0.3) (Figure 4). For energy performance analysis purposes, these buildings are located in various cities of Kosovo, i.e. in Prishtina, Prizren, Peja, Mitrovica and Gjilan, as shown in Figure 1. These cities lie in peripheral parts of the country and are characterized by their climatic conditions. Even though three of these cities have similar climatic conditions, the aim was to verify whether energy demand is different as a result of geographical position and differences in altitude.

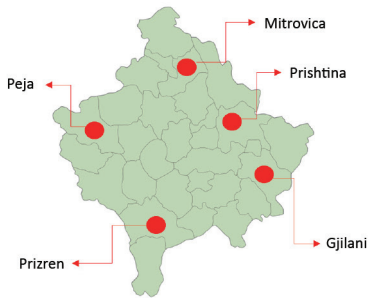


Figure 1. Five cities where energy performance of buildings was analysed.

Although the climate of Kosovo is mostly continental [15], the highest temperature of the country is around $+29^{\circ}\text{C}$ during the summer and the lowest around -10°C during the winter, while average temperatures range from approximately $+20^{\circ}\text{C}$ during the summer to approximately 0°C during the winter [16]. So, all these cities have similar temperatures, but they differ by the number of sunny days throughout the year. The information about Heating and Cooling Degree Days (HDD, CDD), average solar radiation, altitudes and locations where the buildings are located, is presented in Table 1. Typical annual meteorological data are calculated using the data from the Strusoft Climate Server [17] for the five cities in Kosovo.

Table 1. Various factors that affect heating and cooling energy demand

Altitude		Latitude		Longitude		HDD		CDD		Avg. Solar radiation [Wh/m ²]
PRISHTINA	672 m	42° 40' 11.7610"	21° 11' 18.8732"	3372.88	(66 %)	1702.38	(34 %)	450.44		
PRIZREN	438 m	42° 13' 8.7060"	20° 44' 45.9312"	3783.79	(72 %)	1443.57	(28 %)	459.00		
PEJA	505 m	42° 39' 19.2312"	20° 17' 44.2392"	4024.71	(76 %)	1276.62	(24 %)	459.26		
MITROVICA	505 m	42° 53' 16.1520"	20° 51' 31.4424"	3372.88	(66 %)	1702.38	(34 %)	450.44		
GJILAN	501 m	42° 27' 42.0192"	21° 28' 30.9396"	3372.88	(66 %)	1702.38	(34 %)	450.44		

StruSoft's software - VIPcore calculation engine integrated in ARCHICAD [18], complying with ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 [19], was used because the energy performance could not be calculated through Kosovo national calculation methodology due to lack of relevant software. ARCHICAD with EcoDesigner STAR add-on was selected as it is considered to be a detailed simulation approach, because all parameters are related to physical specifics of the materials generated by the 3D model of the building. More approaches relating to building energy simulations can be found in [20]. All the spaces of this model house, functioning as separate areas in the ARCHICAD software, were generated automatically as thermal blocks using software for the dynamic simulation of buildings, as presented in Figure 2. These

thermal blocks evaluate the temperature and control the heat exchange from one area to another, thus calculating thermal bridges as well. Each thermal block provides specific information on energy performance through EcoDesigner STAR and as such is controlled and calculated separately enabling achievement of desired energy demand targets.

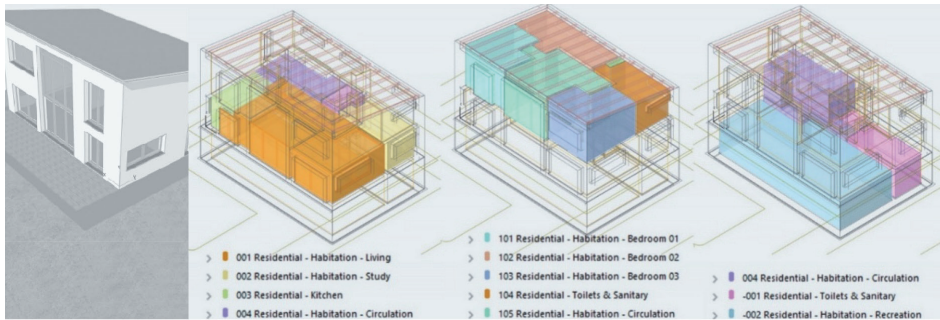


Figure 2. Thermal blocks and their geometry

3 Determination of cost-optimal levels through financial calculation

Since the regulation on the national calculation methodology [2, 3] does not specify the way in which cost-optimal levels or financial implications for different time periods should be defined, the calculation methodology was adopted based on the Guideline [21] accompanying the regulation No. 244/2012 [22]. According to [23], cost-optimal levels are defined as *“the energy performance level which leads to the lowest cost during the estimated economic lifecycle”*. The calculation is made through the Global Cost Methodology, which is known in the regulation as *“the lifecycle cost analysis”*. Using an appropriate financial calculation, the Global Cost analysis considers the investment itself for the period of 30 years as defined in the regulation for residential buildings. However, since the results for all cities give the same investment option, the Global Cost calculation was also conducted for a 20-year period. In this paper, various combinations of the model building envelope were tested and compared with respect to their global cost, by relating the calculations of the initial investment cost, annual cost and energy cost, to the starting year (2020) of the calculation. Global Costs were calculated by summing various types of costs and the discount rate was set to 4 %. In addition, all applicable taxes and fees were included in the calculation.

The equation of Global Cost is defined as follows:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \cdot R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (1)$$

- $C_g(\tau)$ - global cost over the calculation period (referring to starting year τ_0)
 C_i - initial investment costs for a measure or a set of measures j
 $C_{a,i}(j)$ - annual cost during year i for a measure or a set of measures j
 $V_{f,\tau}(j)$ - residual value of a measure or a set of measures j at the end of calculation period (discounted to the starting year τ_0).
 $R_d(i)$ - discount factor for year i based on discount rate r to be calculated

Current prices for materials and construction, relating to measurement of the heating and cooling energy demand, are presented in Table 2. To calculate the initial investment cost, real selling prices of these construction materials are provided by two local construction companies, and average prices including VAT are taken into account. Prices for thermal insulation of building envelope, roof and floor are given per square meter, while fixed prices are given for doors and windows. These prices reflect the current situation on the market and should therefore be updated on a regular basis.

Table 2. Prices of materials used in building envelope

Type	U-value [W/m ² K]	Building material	Width [cm]	Qty	Unit	Price [€/m ²] incl.VAT	Total price [€]	Total price (gross floor area) [€/m ²]
Wall	0.15	Expanded Polystyrene (EPS)	25	277.27	m ²	26.50	7,347.66	27.49
	0.2		18			19.50	5,406.77	20.23
	0.35		9			10.50	2,911.34	10.89
	0.5		6			9.00	2,495.43	9.34
Roof	0.15	Mineral wool	20	98.01	m ²	66.50	6,517.67	24.38
	0.2		14			50.00	4,900.50	18.33
	0.3		8			34.00	3,332.34	12.47
Glazing	0.6	Wood window, triple-glazed, argon fill, clear, low-e		52.68	m ²	180	9,482.63	35.48
	1.1	Wood window, double-glazed, argon fill, clear, low-e				150	7,902.20	29.56
	1.5	Wood window, double-glazed, argon fill, clear				130	6,848.57	25.62
Floor	0.15	Extruded Polystyrene (XPS)	18	71.83	m ²	22.50	1,616.18	6.05
	0.2		12			16.50	1,185.20	4.43
	0.3		7			10.00	718.30	2.69

The price of electricity is calculated based on local rates with 1 kWh costing 0.0532 EUR. In addition, a fixed monthly fee of 1.74 EUR should be added as well at the 8 % VAT. Annual costs include the sum of all costs for each year and the final value. Replacement and maintenance costs are not considered because their lifetime is assumed to be equal to the calculation period.

4 Results and discussion

Five cities in Kosovo with the same climate have been selected for analysis in this paper. The case study involves comparison between baseline buildings and their envelope properties. The energy of the model building was simulated using the EcoDesigner STAR software. The heating and cooling energy demand of the baseline building is presented in Figure 3 for each of the five cities. This demand varies from 23.97 kWh/m²a to 32.70 kWh/m²a for heating and from 35.75 kWh/m²a to 47.13 kWh/m²a for cooling. Therefore, the demand for cooling is higher than that for heating. However, it is interesting to note that Kosovo needs more energy for heating than for cooling. The cooling energy demand is high due to high g-value of the double pane glazing, and also because the south façade has approximately 43 % of glazed surface. Energy saving measures were established by comparing the model of the house using various performances of its envelope, taking into account the heating and cooling energy demand only.

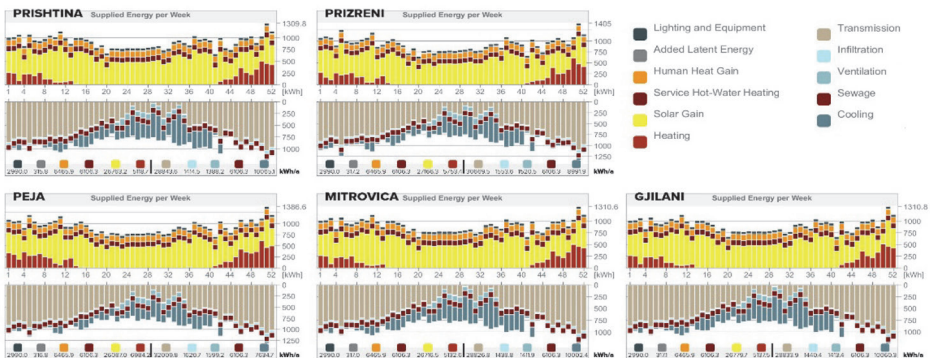


Figure 3. Energy balances presented via EcoDesigner STAR

After many simulations between U-value combinations, the cities with small heating and cooling energy demand differences have been identified. This curve shows linearity for all cities but with a difference of about 7.31 % for the same thermal performance. 108 combinations of U-values, and the total heating and cooling energy demand, are presented in Figure 4 for each of the analysed cities.

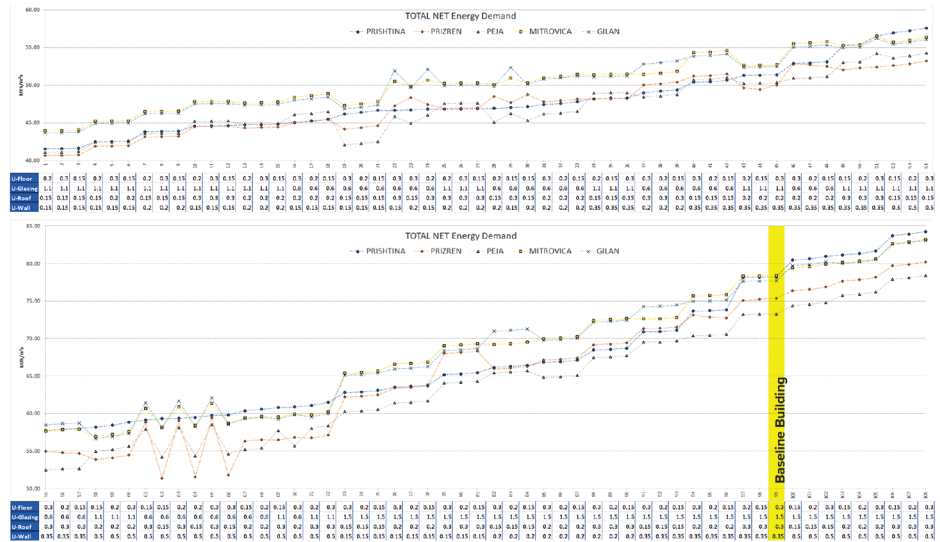


Figure 4. Total heating and cooling energy demand based on 108 combinations of U-values for five cities

Based on the final data from the EcoDesigner STAR software, it was established that characteristics of the cities located in the north-eastern part of the country, i.e. Prishtina, Mitrovica, and Gjilan, differ from those of the cities located in south-western Kosovo, i.e. Prizren and Peja. The north-eastern cities exhibit mostly similar total energy demand values because they have the same HDD, CDD and Average Solar radiation values, while the altitude is higher in Prishtina only. On the other side, the cities of Peja and Prizren present a slightly better performance in terms of lower heating and cooling energy demand compared to other cities. It seems that similar buildings located in different cities exhibit small differences in energy performance, which is why it can be confirmed that only one reference climate is acceptable in Kosovo.

It is not always possible to select the best energy performance option based on software simulations. The information about the heating and cooling energy demand, financial cost, and energy consumption, was obtained through optimisation for the 20 and 30 year periods. All simulated variants for heating and cooling energy demand of the model building, based on the investment cost and required energy, are presented in Figure 5. According to the cost-optimal methodology, financial calculation diagrams were obtained based on the lowest cost and optimum energy consumption. As can be seen in Figure 5, energy performance points vary from 40.64 kWh/m² to 84.27 kWh/m². The values shown in the global cost diagram range from 83.93 EUR/m² to 208.82 EUR/m². For the period of 30 years and for all cities,

the cost-optimal level for this model building resulted in the most favourable combination ($U_{\text{wall}} - 0.15$, $U_{\text{glazing}} - 1.1$, $U_{\text{roof}} - 0.2$ and $U_{\text{floor}} - 0.3$) with the thermal insulation thickness of 25 cm in wall, 14 cm on the roof, and 7 cm in the floor, and with the double-glazed, argon filled, clear, low-e wooden window. Cost optimal levels from global-cost diagram are presented for 30 and 20 years in Table 3.



Figure 5. Cost-optimal levels for five cities and the baseline building

Table 3. Cost-optimal levels for 30 and 20 years in five cities

30 years	kWh/m ² a	Prishtina	42.51	Prizren	41.91	Peja	42.45	Mitrovica	45.22	Gjilan	44.94
	EUR/m ²		91.42		89.37		91.22		100.7		99.74
20 years	kWh/m ² a	Prishtina	46.83	Prizren	44.36	Peja	44.86	Mitrovica	47.68	Gjilan	47.41
	EUR/m ²		83.93		84.15		85.29		91.74		91.12

The combination of U-values of $U_{\text{wall}} - 0.2$, $U_{\text{glazing}} - 1.1$, $U_{\text{roof}} - 0.2$ and $U_{\text{floor}} - 0.3$ may also be a suitable option for the city of Prishtina and so the thickness of thermal insulation in the wall is 18 cm, and is equal to 44.76 kWh/m²a for a global-cost of 91.94 EUR/m², which is more applicable in the Kosovo market. Therefore, the differences in money seem to be more significant compared to those in energy savings. If these cost-optimal U-values are compared with values that come from legislation or baseline building, big differences can be seen both in financial terms and in energy consumption. If the example of Prishtina for a thirty-year period is considered, the energy consumption can be reduced from 78.22 to 42.51 kWh/m²a, and the global cost from 187.39 to 91.42 EUR/m², or by about 50 %. Results seem to be quite similar for the other cities as well. As to the period of 20 years, the energy consumption can be reduced from 78.22 to 46.83 kWh/m²a, and the global cost

from 142.51 to 83.83 EUR/m², which is the difference of approximately 40 %. In the 20 year-period, the most favourable combination of the cost-optimal level for all cities except Prishtina is $U_{\text{wall}} -0.2$, $U_{\text{glazing}} -1.1$, $U_{\text{roof}} -0.2$ and $U_{\text{floor}} -0.3$, while for Prishtina this combination is $U_{\text{wall}} -0.2$, $U_{\text{glazing}} -1.1$, $U_{\text{roof}} -0.3$ and $U_{\text{floor}} -0.3$). Taking into consideration all these results, the legislation in force should be reexamined and possibly changed, since the global cost analysis shows opportunities for improvement. Also, this building can be used as a reference for all buildings that have the same characteristics such as size, shape, occupancy, and climate. Although these cities exhibit some variations in the heating and cooling energy demand, the same optimal U-values can be adopted. The same calculation methodology can be used to find the optimal U-values and energy demand for all other types of buildings.

5 Conclusions

The aim of this paper was to provide detailed calculation of the heating and cooling energy demand for the purpose of finding optimum U-values in the building envelope and to compare these values with those proposed in the regulation. In addition, the paper takes into account the current regulation, analyses its elements, and offers possible combinations for the purpose of improving the deficiencies arising from the current legislation. The study is assessed as necessary, due to lack of Kosovo's literature in this field. Moreover, it presents some combinations of U-values for changing thermal properties in the model building envelope and finding which U-values are optimal for five cities in Kosovo (Prishtina, Prizren, Peja, Mitrovica, and Gjilan). The building model is located in continental climate that requires mixed heating and cooling for each city. The modelling of this building was conducted by means of the ARCHICAD program, while detailed simulations were performed using the EcoDesigner STAR add-on, by executing hourly dynamic energy analysis for input data in order to produce energy simulation results. The calculations were made only for the heating and cooling energy demand in the building, taking into account parameters such as solar gains, orientation, building materials and structures, openings, and natural ventilation. Construction materials adopted for the basic model of the house include materials that are most often used in Kosovo. Based on the achieved results, it can be concluded that there is a difference in the required energy demand for heating and cooling for the baseline building, with the cooling demand of around 56.22 kWh/m²a and the heating demand of about 29.20 kWh/m²a. After many different combinations of U-values were tested, the simulations show that the same building located in different cities exhibits small differences in energy performance. Concerning the sample results from the perspective of cost-optimal methodology, it can be stated that, in the period of 30 years, the same optimal U-values are presented in the diagram, and that these values are the same

for the analysed five cities in Kosovo. The exception on the global-cost diagram for the period of 20 years is Prishtina only. After the global cost analysis, the optimal U-values were compared with the U-values of the baseline building, and the results showed that the current legislation needs to be reviewed. In addition, the legislation should specify energy requirements for different types of buildings, rather than only provide maximum allowable U-values. This model building can be used by central and local authorities as a reference building for the calculation of optimal U-values building types with similar characteristics. Furthermore, the demand for heating is higher than that for cooling in Kosovo although the opposite case is shown in the paper. It can thus be concluded that modification should be made in subsequent work in terms of architecture so as to enable the necessary reduction of cooling demand, which will result in improvement of an overall performance of the building, and in reduction of initial investment in the building envelope.

References

- [1] European Parliament: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of building (recast), Official Journal of the European Union, 2010.
- [2] MESP: Regulation MESP No.04/18 for Minimum Requirements for the Energy Performance of Buildings, Ministry of Environment and Spatial Planning, 2018.
- [3] MESP: Regulation MESP No. 02/18 on National Calculation Methodology for Integrated Energy Performance of Buildings, Ministry of Environment and Spatial Planning, 2018.
- [4] KAS: Bilanci i Energjisë TM1 2020, Kosovo Agency of Statistics, 2020.
- [5] Ahmeti, P., Dalipi, I., Basha, A., Kistelegdi, A.: Current heating energy demand by the residential sector in city Prishtina based on the main resources, *Pollack Periodica* (2017) 12, pp. 147-158.
- [6] Meha, D., T. Novosel, T., Duić, N.: Bottom-up and top-down heat demand mapping methods for small municipalities, case Glogoc, *Energy* (2020) 199, pp. 1-9.
- [7] Corgnati, S. P., Fabrizio, E., Filipp, M., Monetti, V.: Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application, *Applied Energy* (2013) 102, pp. 983-993.
- [8] Ferrara, M., Fabrizio, E., Virgone, J., Filippi, M.: A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings, *Energy and Buildings* (2014) 84, pp. 442-457.
- [9] Longo, S., Montana, F., Sanseverino, E. R.: A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations, *Sustainable Cities and Society* (2019) 45, pp. 87-104.

- [10] Hamdy, M., Hasan, A., Siren, K.: A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010, *Energy and Buildings* (2013) 56, pp. 189-203.
- [11] Ascione, F., Bianco, N., Stasio, C. D., Mauro, G. M., Vanoli, G. P.: A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance, *Energy and Buildings* (2015) 88, pp. 78-90.
- [12] Bajraktari, E., Nushi, V., Almeida, M.: Cost efficiency of retrofit measures for typical masonry houses in Kosovo, *International Review of Applied Sciences and Engineering* (2019) 10, pp. 87-91.
- [13] Architectural Design Studio-ArchiEDU, www.archiedu.com
- [14] MESP: Regulation MESP No. 03/16 for minimum technical standards for residential buildings in condominium, Ministry of Environment and Spatial Planning, 2016.
- [15] IHMK: Të dhënat meteorologjike mesataret mujore 2001-2019, Hydrometeorological Institute of Kosovo, 2019.
- [16] IHMK: Vjetari Hidrometeorologjik i Kosovës 2017-2018, Kosovo Environmental Protection Agency - KEPA, 2019.
- [17] StruSoft, VIP-Energy Climate data creator: NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, 2010.
- [18] GRAPHISOFT-ARCHICAD EcoDesigner STAR, https://www.graphisoft.com/archicad/ecodesigner_star/
- [19] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs: ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.
- [20] Coakley, D., Raftery, P., Keane, M.: A review of methods to match building energy simulation models to measured data, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2014) 37, pp. 123-141.
- [21] European Commission: Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012, Official Journal of the European Union, 2012.
- [22] European Commission: Regulations - Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance, Official Journal of the European Union, 2013.
- [23] BUILD UP-The European Portal for Energy Efficiency in Buildings, www.buildup.eu.

Potential of red mud as raw material for alternative binders in concrete

Ivana Vladić Kancir¹, Asst. Prof. Marijana Serdar²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, ivana.vladic.kancir@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, marijana.serdar@grad.unizg.hr

Abstract

Storage of large quantities of industrial by-products can pose a serious environmental problem. There is a growing need to recycle these industrial by-products, including red mud, in the construction industry, which is one of the largest consumers of raw materials. A preliminary study of the potential of red mud as a raw material for concrete is presented in this paper. Chemical composition of red mud, determined by X-ray fluorescence and particle size distribution by laser diffraction, is tested as part of its initial evaluation. The reactivity of red mud is evaluated by the R3 test method with isothermal calorimetry. The compressive strength test is carried out on a mortar sample in which 30% by weight of cement is replaced by red mud. Preliminary tests indicate that red mud can be used as raw material in alternative binders.

Key words: red mud, compressive strength, R3 test, supplementary cementitious material, concrete

Potencijal crvenog mulja kao sirovine za alternativna veziva za beton

Sažetak

Skladištenje velikih količina industrijskih nusproizvoda može predstavljati ozbiljan ekološki problem. Sve je veća potreba za recikliranjem tih industrijskih nusproizvoda, uključujući crveni mulj, u građevinskoj industriji koja je jedan od najvećih potrošača sirovina. Ovaj rad pokazuje preliminarno istraživanje potencijala crvenog mulja kao sirovine za beton. Kao dio početne procjene crvenog mulja prikazan je njegov kemijski sastav, određen rendgenskom fluorescencijom, i raspodjela veličine čestica, određena laserskom difrakcijom. Reaktivnost crvenog mulja procijenjena je metodom R3 baziranom na izotermalnoj kalorimetriji. Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je na uzorku morta u kojem je 30% mase cementa zamijenjeno crvenim muljem. Preliminarni rezultati pokazuju da se crveni mulj može koristiti kao sirovina u alternativnim vezivima.

Ključne riječi: crveni mulj, tlačna čvrstoća, R3 ispitivanje, mineralni dodatci, beton

1 Introduction

Due to an increased demand for housing caused by population growth, concrete consumption has increased to such an extent that it has become the second most frequently used material in the world after water [1]. It is estimated that the cement industry alone will be responsible for 24 % of total global CO₂ emissions by 2050 [2]. In order to meet people's need for urbanisation, while meeting European targets for protecting natural resources and reducing emissions, there is a strong motivation to develop more sustainable construction solutions with lower environmental impact, and in line with the seventh basic requirement for construction - the sustainable use of natural resources [3].

CO₂ is emitted during production of Portland cement clinker in two ways, namely a) through the energy input required to heat the cement kiln and b) through the decarbonization of calcium carbonate (CaCO₃) [4]. The first case accounts for 40-50 % of emissions during production, while the chemical reaction of calcium carbonate releases accounts for the rest. Considering that the raw material in Ordinary Portland cement (OPC) consists mainly of CaCO₃ (75 to 79 %) [4], the above-mentioned emissions can significantly be reduced by large-scale replacement of clinker with cement-like additives (SCM). Alternative materials that can be used in sustainable concrete structures are mainly industrial by-products in the form of finely crushed material that is added to the cement as partial replacement in order to improve certain properties and/or create some special properties [5].

Disposal of non-ferrous industrial and municipal solid waste has always been an important environmental issue. Red mud (RM) is a typical non-ferrous industrial solid waste [6]. RM is a bauxite residue from the Bayer process, which is used in alumina production. The Bayer process is the most important industrial process for refining bauxite to produce alumina (aluminium oxide). Bauxite, the main aluminium ore, contains only 30-54 % alumina (alumina), Al₂O₃, while the rest is silica, iron oxides and titanium dioxide. Alumina must be purified before it can be refined into aluminium. In the Bayer process, bauxite is decomposed by washing with warm sodium hydroxide solution, NaOH, at a temperature of 175°C. This converts the alumina in the ore to sodium aluminate, 2NaAl(OH)₄, according to equation (1):



Other bauxite components can not be dissolved. The solution is cleaned by filtration to remove solid impurities. The mixture of solid impurities is called red mud (RM) and is a problem for disposal [7]. In addition, open land disposal of RM contaminates the environment, causing ecological imbalance. Annual emissions of red mud are estimated at more than 70 million tons worldwide [8].



Figure 1. Red mud landfill [9]

In Southeast Europe, there are several active aluminium processing plants and red mud landfills, which remain at the plant site even after plant closure. In Croatia, the inactive Jadral plant near Obrovac has been closed since 1982, but a 720 000 m³ landfill is still there. In Montenegro, Uniprom KAP is an aluminium plant that produces over 120,000 tons of alumina per year. Its waste is disposed of in two large landfills nearby, each of which contains over four million tons of waste. There are also two red mud landfills in Bosnia and Herzegovina at Birač near Zvornik and at Dobro Selo near Mostar. The landfill in Dobro Selo contains over ten million tons of waste and represents a potential threat to the environment.

Chemical composition of RM depends on the bauxite ore and the refining process. The most important chemical compounds in RM are iron oxide (Fe₂O₃), aluminium oxide (Al₂O₃), sodium oxide (Na₂O), silicon dioxide (SiO₂), titanium oxide (Ti₂O), and calcium oxide (CaO) [10]. RM is also highly alkaline in nature. Conventional methods for the disposal of red mud at a landfill near the factory were simple and inexpensive. However, potential impact on the surrounding groundwater and environment, and difficulties associated with surface remediation, have led to significant changes in waste management practices. The use of RM has been limited due to its high iron content, presence of alkalis, and very small particle size.

Studies have been carried out on the use of RM as raw material in various industries, such as in brick industry, ceramic tile production, chemical industry and in the production of metal absorbents [10]. RM is an alkaline, cement-like material and can be used as a partial substitute for cement to reduce CO₂ emissions and soil pollution through the disposal of RM [11]. In addition, RM has high alumina and silica content [12]. When cement is hydrated, calcium hydroxide reacts with silica in the RM cement, thus increasing the strength of the concrete [13]. The presence of aluminates and ferrites increases the reactivity of silica in cementitious materials [14]. Senff et al [15] and Tang et al [16] prepared cement mortar in which up to 50 % of cement was replaced with RM. They reported that the compressive strength and tensile strength decreased with an increase in RM content. Another study by Ribeiro

et al. [17] revealed that an increase in the amount of RM used to replace cement shortened the setting time and reduced pozzolan reactivity, which in turn reduced the strength of cement mortar. On the other hand, it has been reported in literature that RM can improve resistance of concrete to chloride penetration due to its filling effect and high alkalinity [18]. Iron oxide and aluminium oxide are predominant chemical compounds in RM, and they potentially improve the surface layer that protects reinforcement from carbonation and chloride ion attack [18]. The use of RM in alkali activated materials (AAM) has also been investigated by some researchers [26-29]. In most cases, it was used in combination with other aluminium silicate minerals such as metakaolin and fly ash [19]. It has been observed that the AAM red mud exhibits reasonable compressive strength [19]. In addition, alkali activation makes it possible to significantly increase the quantity of red mud incorporated in cement and concrete without impairing physicommechanical properties of cement and concrete [20].

The aim of this research is to evaluate basic properties of red mud from a land-fill in Bosnia and Herzegovina as part of a more systematic approach to screening by-products and waste streams as potential raw materials in concrete. Previous research has shown that red mud from Dobro Selo, Mostar, Bosnia and Herzegovina, reduces mechanical properties of concrete but improves its durability properties, especially its resistance to chloride diffusion. The same red mud source was used for this research and, as a first step in the research, chemical and physical properties of red mud, as well as its reactivity, were analysed by determining heat development with calorimetry, and strength development.

2 Materials and methods

2.1 Materials

Red mud (RM) from Dobro Selo near Mostar, Bosnia and Herzegovina, was evaluated in this study. In addition, fly ash from Tuzla and cement CEM I 42.5 R were used for comparison purposes. Both red mud and fly ash were first dried in an oven for 24 ± 2 h at $60 \pm 5^\circ\text{C}$ and then ground in a disc mill for 2 minutes.



Figure 2. Dried samples of red mud and fly ash

2.2 Methods

2.2.1 Chemical composition

Chemical composition of the materials was determined by X-ray fluorescence (XRF) in cooperation with the accredited laboratory "HEP-proizvodnja d.o.o.", Central Chemical-Technological Laboratory, Zagreb. The materials were tested in two conditions: "as received" and after being dried at 110 °C. The difference in the results depends on moisture content of the material. Relevant results presented here are those obtained in dry condition.

2.2.2 Particle size distribution

Particle size distribution (PSD) was tested using the laser diffraction method with the MASTERSIZER instrument (Malvern instruments) at EPFL Federal Institute in Lausanne, Switzerland. The test was performed according to the guidelines [22]. Before the test, the sample was dispersed in a specific solvent. The prepared liquid was dispersed in an ultrasonic bath for 15 minutes and then placed on a magnetic stirrer until the room temperature was reached. A laser diffraction test was then performed.

2.2.3 Reactivity by calorimetry

The R3 test [24], developed for the RILEM TC-267 committee, was used to determine reactivity of red mud and fly ash. This was carried out at 40 °C by isothermal calorimetry, and it involved determination of the total release of hydration heat from the paste composed of the SCMs, for 7 days. Before the test, SCMs and dry reagents were weighed, mixed and held at 40 ± 2 °C for 24 h. The formulation of solid blends relies on the ratio of $\text{Ca(OH)}_2/\text{SCM}$ and CaCO_3/SCM of 3 and $\frac{1}{2}$, respectively. In addition, an alkaline solution 3M of K was prepared with KOH and K_2SO_4 . The pastes with red mud and fly ash were prepared in a high shear mixer at 1600 ± 50 rpm and mixed for 2 minutes until a homogeneous paste was obtained. The pastes were immediately poured into a glass vial and placed in the isothermal calorimeter. The cumulative heat release acquired was given per g SCM. The corresponding results are shown in Figure 6.

2.2.4 Evolution of compressive strength

Standard mortars were cast according to HRN EN 196-1 [23] to determine strength development of the blends. Mortar samples were prepared with CEM 1 45.2 R, and 30 % of the cement mass was replaced by red mud and fly ash. The water-binder

ratio was constant, i.e. 0.5. The standardized sand was used as aggregate and there was no need for water adjustment. After casting, 40 x 40 x 160 mm samples were covered with plastic foil and kept for 24 h under laboratory conditions. After demoulding, the samples were cured in a damp chamber until the test time. The compressive strength test was determined on 2 prisms after 2, 7, and 28 days of curing.

3 Results

3.1 Characterization of red mud

Table 1 shows chemical analysis of cement CEM I 42.5 R, red mud (RM), and fly ash (FA). The main RM constituents are Fe_2O_3 , SiO_2 and Al_2O_3 , which account for about 75 % of the total composition. Compared to fly ash, red mud has a lower content of silicon dioxide and a higher content of iron oxides. Furthermore, red mud has a significantly higher content of Na_2O (7.23 % compared to 0.26 % in fly ash) and a lower content of SO_3 (0.24 % compared to 1.48 % in fly ash).

Table 1. Chemical composition of red mud, fly ash and cement

Constituents	Red mud	Fly ash	CEM I 42,5 R
P_2O_5	0.47	0.36	
Na_2O	7.23	0.26	
K_2O	0.18	1.51	
CaO	9.96	11.52	64.04
MgO	0.61	2.78	1.83
Al_2O_3	16.94	19.11	4.86
TiO_2	4.13	0.52	
Fe_2O_3	37.88	9.05	2.94
SiO_2	21.95	53.28	19.32
MnO	0.43	0.13	
SO_3	0.24	1.48	2.75

3.2 Particle size distribution

The particle size distribution of RM is shown in Figure 3. Red mud particles range from 0,05 to 65 μm in size. The highest number of particles is in the range of 0,1 – 1 μm . Compared to fly ash samples and Portland cement samples, where most particles are between 1 and 100 μm , RM particles are finer.

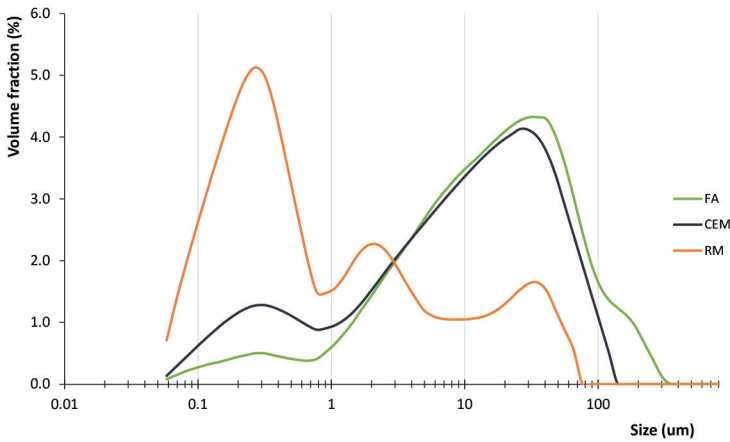


Figure 3. Particle size distribution of red mud (RM), fly ash (FA) and cement (CEM)

3.3 Mechanical properties of mortar samples

Compressive strength results are shown in Figure 4. A mixture with 30 % red mud (RM) showed lower compressive strength results than the OPC mortar after 28 days. However, a rapid increase in strength can be observed after 2 days for the sample with RM. The fly ash sample initially exhibited a lower compressive strength than the RM sample, but the fly ash sample strength was higher after 7 and 28 days.

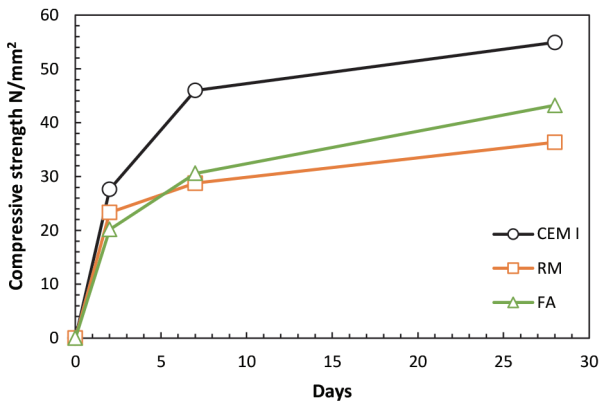


Figure 4. Compressive strength results for mortar samples with cement (CEM I), 30 % of red mud (RM) and 30 % of fly ash (FA)

This difference in strength increase is particularly evident when looking at relative compressive strength values in Figure 5. The relative strength is defined as the ratio

of strength results obtained from the mixtures to compressive strength results of the OPC mortar sample.

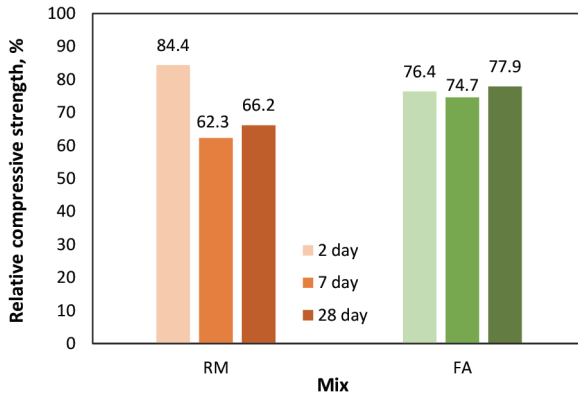


Figure 5. Compressive strength of mortar with 30 % replacement by red mud (RM) and fly ash (FA) relative to mortar with cement

3.4 Pozzolanic reactivity of red mud

Figure 6 shows the total heat release during the R3 test performed on red mud and fly ash. According to the R3 test [23], the amount of heat can be used to assess the reactivity of SCMs. During the first 5 hours, the red mud sample showed a higher heat release, indicating a fast initial reaction. Compared to red mud, fly ash showed a slower initial reaction, but a higher long-term reactivity. These results are in strong agreement with compressive strength results.

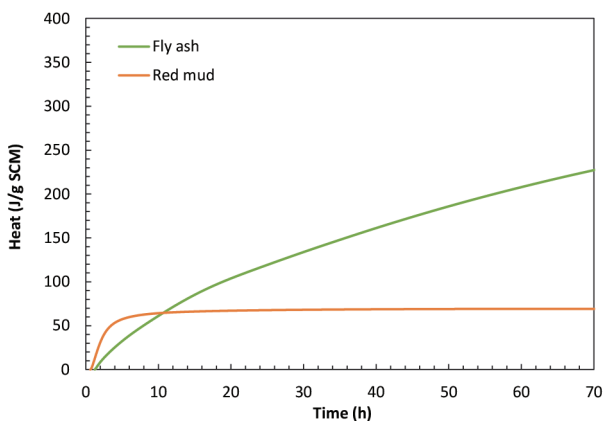


Figure 6. Results obtained by heat release measurement via R3 test using isothermal calorimetry

4 Conclusion and further research

The red mud used in this research is characterised as a very fine powder consisting mainly of Fe_2O_3 , SiO_2 and Al_2O_3 , which account for about 75 % of its total composition. A large amount of alkalis is also characteristic of this waste material. The largest proportion of particles is in the range of 0.1 - 1 μm . Both the heat development and the compressive strength development showed that red mud reacts very quickly during the first few hours, and that later on it has low reactivity, especially compared to fly ash.

Based on the presented analysis, it can be concluded that the red mud used in this research has a potential as a raw material for concrete production. Even though strength tests show lower values, due to the large number of fine particles, red mud could potentially improve durability properties of concrete and ensure the filling of fine pores. Further research, which is to consider high levels of alumina and silica and high alkalinity, will be focused at developing alkali-activated binders based on red mud. In addition to durability aspect, possible radioactivity of red mud will be investigated in further research, which might narrow its potential for use in construction industry.

Acknowledgement

The research presented in the paper is part of a scientific project "Alternative binders for concrete: understanding the microstructure to predict durability, ABC" (UIP-05-2017-4767), funded by Croatian Science Foundation.

References

- [1] World Business Council for Sustainable Development, Cement Industry Energy and CO₂ Performance - Getting the Numbers Right, 2009.
- [2] J. L. Provis, Green concrete or red herring? - Future of alkali-activated materials, *Advances in Applied. Ceramics*, vol. 113, no. 8, pp. 472–477, 2014.
- [3] E. Commission, Regulation of the European Parliament and of the Council, vol. 1, no. 2011. pp. 1–119, 2011.
- [4] K. L. Scrivener and A. Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future, *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 7, pp. 651–665, Jul. 2011.
- [5] M. Serdar, D. Bjegovic, N. Stirmer, and I. Banjad Pecur, Alternative binders for concrete: opportunities and challenges, in *Scientific Symposium Future Trends in Civil Engineering*, no. Zagreb, October 2019, pp. 199–218.

- [6] Y. Li, X. Min, Y. Ke, D. Liu, and C. Tang, Preparation of red mud-based geopolymer materials from MSWI fly ash and red mud by mechanical activation, *Waste Manag.*, vol. 83, pp. 202–208, 2019.
- [7] Rusković, N. (2013) *Mogućnosti primjene crvenog mulja u betonskoj industriji*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
- [8] H. Geng, J., Zhou, M., Zhang, T., Wang, W., Wang, T., Zhou, X., Wang, X., Hou, Preparation of blended geopolymer from red mud and coal gangue with mechanical co-grinding preactivation. *Materials and Structures* 50, 109., 2017
- [9] Deset milijuna tona crvenog mulja kod Mostara, <http://m.pogled.ba/clanak/deset-milijuna-tona-crvenog-mulja-kod-mostara/34842>.
- [10] C. Venkatesh, N. Ruben, M. Sri, and R. Chand, Red mud as an additive in concrete : comprehensive characterization, *Journal of the Korean Ceramic Society* , 2020.
- [11] M. Abdel-Raheem, L.M. Gómez Santana, M.A. Piñeiro Cordava, B. Olazarán Martínez Uses of red mud as a construction materia, pp. 388–399, 2017.
- [12] P. C. Taylor, *Curing concrete*, 2014.
- [13] C. Venkatesh, R. Nerella, and M. Sri Rama Chand, Comparison of mechanical and durability properties of treated and untreated red mud concrete, *Mater. Today Proc.*, vol. 27, pp. 284–287, 2020.
- [14] G. R. Kumar, M.S.R. Chand, P.R. Kumar, P.S.N.R. Giri, Performance and microstructure characteristics of self-curing selfcompacting concrete, *Adv. Cem. Res*, vol. 30, no. 10, pp. 451–468, 2018.
- [15] L. Senff, D. Hotza, and J. a. Labrincha, Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars, *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 163–170, Jan. 2011.
- [16] H. C. W. Tang, Z. Wang, Y. Liu, Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater*, pp. 178,288-300, 2018.
- [17] D. V. Ribeiro, J.A. Labrincha, M.R. Morelli Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement, *Materials Research* pp. 60–66, 2011.
- [18] D. V. Ribeiro, J.A. Labrincha, M.R. Morelli Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete, *Materials Research* pp. 124–133, 2012.
- [19] A. Kumar and S. Kumar, Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization, *Construction and Building Materials.*, 38, pp. 865–871, 2013.
- [20] P. Krivenko et al., Development of alkali activated cements and concrete mixture design with high volumes of red mud, *Construction and Building Materials.*, vol. 151, pp. 819–826, 2017.

- [21] M. Serdar, I. Biljecki, and D. Bjegovic, High-Performance Concrete Incorporating Locally Available Industrial By-Products, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 1–8, 2017.
- [22] B. Lothenbach, K. Scrivener, and R. D. Hooton, Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1244–1256, Dec. 2011.
- [23] “European Committee for Standardization (CEN), EN 196-1:2016 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
- [24] F. Avet, R. Snellings, A. Alujas Diaz, M. Ben Haha, and K. Scrivener, Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays, *Cement and Concrete Research*, vol. 85, pp. 1–11, 2016.

Usavršavanje na Faculty of Electrical Science and Computer Engineering, TU Ostrava

Katarina Vranešić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, katarina.vranesic@grad.unizg.hr

Sažetak

Radi boljšega razumijevanja djelovanja lutajućih struja na tračnice u urbanim kolosijecima, stupila sam u kontakt s djelatnicima na Faculty of Electrical Science and Computer Engineering, TU Ostrava, Češka te dogovorila boravak na TU Ostrava u trajanju od tri tjedna. Prije odlaska napravljen je plan posjeta, zajedno s pripremljenim temama za diskusije. Prvi tjedan posjeta bio je rezerviran za brojne konzultacije i diskusije na temu djelovanja lutajućih struja te pripreme radove za terenska mjerenja. Nakon obavljenih pripremnih radova, u dogovoru s predstavnikom operatora tramvajske infrastrukture Dopravni podnik Ostrava provedena su terenska mjerenja lutajućih struja na nekoliko lokacija tramvajskog kolosijeka. Zadnji tjedan boravka bio je rezerviran za obradu i analizu prikupljenih podataka koji će se koristiti za izradu znanstvenog rada.

Ključne riječi: usavršavanje, TU Ostrava, lutajuće struje, tramvajski kolosijek

Training at the Faculty of Electrical Science and Computer Engineering, TU Ostrava

Abstract

To better understand the stray current impact on rails in urban tracks, I have contacted professors at the Faculty of Electrical Engineering and Computer Engineering, TU Ostrava, Czech Republic. We both agreed I should come to Ostrava and stay for three weeks. Before leaving, I made a visit schedule and prepared topics for several discussions. The first week of the visit was reserved for consultations and discussions about stray current and preparation work for field measurements. After preparations were done, in agreement with the tram track operator Dopravni podnik, field measurements of stray currents were carried out at several places on the tram track. The last week in Ostrava was reserved for data analysis. This data will be published in a scientific paper.

Key words: training, TU Ostrava, stray current, tram track

VETROLIGNUM na RiSE poslijediplomskoj istraživačkoj konferenciji

Nikola Perković

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, nikola.perkovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Ovaj rad opisuje osobno iskustvo i napredak predavača na dodatnom obrazovanju i usavršavanju u Centre for Executive Education, Glasgow Caledonian University. Research in Sustainable Enviroments (RiSE) je dvodnevna godišnja konferencija za doktorande i znanstvenike koji predstavljaju svoje istraživanje. Ostvareni cilj posjeta je prikupljanje najnovijih istraživanja i znanja u području građevinarstva, inženjerstva i računarstva na GCU i šire.

Na konferenciji je predstavljen projekt "Vetrolignum" kao sastavni dio doktorskog rada. Boravak je rezultirao stjecanjem novih, prijeko potrebnih znanja, kao i pokretanjem suradnje s mladim znanstvenicima i istraživačima u ovom području. Konačno, izlaganje je prepoznato i ocijenjeno kao najbolje na RiSE konferenciji te je dobiven certifikat i prigodna nagrada.

Ključne riječi: Vetrolignum, RiSE, inovacije, doktorski rad

VETROLIGNUM presented at RiSE Postgraduate Research Conference

Abstract

This paper describes the personal experience and progress of the lecturer in further education at the Center for Executive Education, Glasgow Caledonian University. Research in Sustainable Environments (RiSE) is a two-day annual conference for doctoral students and scientists presenting their research. The achieved goal of the visit is to gather the latest research and knowledge in the field of construction, engineering, and computing at GCU and beyond. The project "Vetrolignum" was presented at the conference as an integral part of the doctoral dissertation. The visit resulted in the acquisition of new, much-needed knowledge, as well as the initiation of cooperation with young scientists and researchers in this field. Finally, the presentation was recognized and rated as the best at the Rise conference, and a certificate and a special award were presented.

Key words: Vetrolignum, RiSE, innovations, doctoral thesis

Analiza troškova i koristi investicijskih projekata

doc. dr. sc. **Lana Lovrenčić Butković**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, lana.lovrencic.butkovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Sveučilište u Milanu - Odjel za ekonomiju, menadžment i kvantitativne metode - u suradnji s CSIL-om (Centrom za industrijske studije) svake godine održava ljetnu školu za izradu analize troškova i koristi investicijskih projekata. Analiza troškova i koristi (engl. CBA) kvantitativni je analitički alat kojim se koristi tijekom procijenjivanja odluka o investiranju, najčešće infrastrukturnih projekata. To je metodologija koju je za odabir i/ili određivanje prioriteta investicijskih projekata predložila i prihvatila Europska komisija, ali i druge institucije i vlade. Ljetna škola je trajala pet dana, a osmišljena je na način da se polaznicima omogući stjecanje teorijske podloge (opća načela i metode CBA), ali i aplikacija ove metodologije u različitim sektorima, kao i kako učinkovito procijeniti i revidirati investicijske projekte što se provodi na stvarnim projektima iz prakse.

Ključne riječi: analiza troškova i koristi, CBA, investicijski projekti, metodologija, EU projekti, CSIL, Europska komisija, Sveučilište u Milanu

Cost-Benefit analysis of investment projects

Abstract

The University of Milan – Department of Economics, Management and Quantitative Methods - in collaboration with CSIL (Centre for Industrial Studies) was organised the IX. edition of Milan Summer School in Cost-Benefit Analysis of Investment Projects. Cost-Benefit Analysis (CBA) is a quantitative analytical tool used to evaluate investment decisions, mostly for infrastructure projects. It is a commonly used methodology adopted by the European Commission and other institutions or governments for the selection and/or prioritization of investment projects. The course lasted for 5 days and was designed to allow participants to acquire a solid background in different aspects (the general CBA principles and methods, in-depth knowledge of different sectoral application and how to efficiently review the quality of a CBA and improve it on – practice on a real-life cases).

Key words: cost-benefit analysis, investment projects, methodology, EU projects, CSIL, Milan Summer School, European Commission

Izrada doktorskog rada: Hrvatska, Skandinavija, Europa i šire

dr. sc. **Ninoslav Holjevac**

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, ninoslav.holjevac@fer.hr

Sažetak

Doktorski studij Sveučilišta u Zagrebu provodi se na mnogim sastavnicama i u različitim znanstvenim područjima. Svaki fakultet je nositelj doktorskog studija iz odgovarajućeg znanstvenog područja. Središnja komponenta sveučilišnog doktorskog studija je znanstveno istraživanje i stvaranje. U okviru poslijediplomskog doktorskog studija studenti se uvode u znanstvenoistraživački rad i pripremaju za karijeru u znanstvenom i akademskom sektoru ili sektoru istraživanja i razvoja u gospodarstvu, gdje će stvaranjem novih znanja i tehnologija pridonijeti napretku i boljitku društva u cjelini. No, put do doktorata nije lak te je potrebno zadovoljiti određene uvjete. Koji su to uvjeti u općenitom slučaju, koji su to uvjeti za slučaj pisanja doktorata prema skandinavskom modelu te kako to izgleda na stranim sveučilištima - tema su ovoga rada koji prikazuje rezultate ankete s iskustvima doktoranda mnogih stranih sveučilišta te daje usporedbu sa Sveučilištem u Zagrebu. Konačno, u radu će se pronaći motivacijski savjeti kako ustrajati i uspjeti na putu do doktorata.

Ključne riječi: doktorski studij, disertacija, skandinavski model, zahtjevi za predaju doktorata, objavljeni radovi

PhD thesis requirements: Croatia, Scandinavia, Europe and wider

Abstract

Doctoral study program of the University of Zagreb is offered by many of its constituent units in different scientific fields. Each Faculty is the holder of the Program in corresponding scientific field. The core components of a university doctoral study are scientific research and creativity. Within the program, the students are introduced to scientific research and prepared for a career in either scientific and academic sectors or for research and development in the industry, where they can contribute to the prosperity and welfare of the society by generating new knowledge. But the road towards the PhD title is not a simple one and there are certain requirements that need to be met. What are the requirement in general, what are the requirement for a Scandinavian model thesis and what are the requirements on foreign universities are the questions answered here. Results from the questionnaire sent to PhD students of foreign universities will be shown and comparison to University of Zagreb will be made. Finally, advice and motivation to stay on the road towards obtaining the PhD will be given.

Key words: PhD study, dissertation, Scandinavian model thesis, requirements for PhD defence, published papers

Iskustva doktorskog studija u okviru znanstvenog projekta Hrvatske zaklade za znanost

dr. sc. **Damjan Bujak**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, damjan.bujak@grad.unizg.hr

Sažetak

Hrvatska zaklada za znanost (HRZZ) financira kompetitivne znanstvene, razvojne i inovacijske projekte. Kroz financiranje projekata HRZZ uključuje doktorande u istraživački rad s primarnim ciljem izrade doktorske disertacije. Također provodi sustavno praćenje i vrednovanje postignutih rezultata doktoranda na doktorskom studiju i u znanstvenoistraživačkom radu. U svojstvu doktoranda, uspješno sam realizirao projektne zadatke i izradio disertaciju unutar zadanih vremenskih okvira. HRZZ je ocijenila znanstveni rad na projektu najvišom ocjenom u konačnom izvješću.

Ključne riječi: doktorski studij, Hrvatska zaklada za znanost, znanstveni projekt, disertacija, doktorand

PhD experiences within a scientific project funded by the Croatian Science Foundation

Abstract

The Croatian Science Foundation (HRZZ) finances competitive scientific, development and innovation projects. Through project financing, the HRZZ endorses doctoral students in research work with the main goal of completing their PhD studies. It also systematically monitors and evaluates the results achieved by doctoral students in PhD studies and in scientific research. As a doctoral student, I successfully completed project assignments and prepared a doctoral dissertation within the given time frames. The HRZZ rated the scientific work on the project with the highest grade in the final report.

Key words: doctoral study, Croatian Science Foundation, scientific project, doctoral dissertation, doctoral student

Međunarodna suradnja kao temelj doktorskog istraživanja

dr.sc. **Dominik Skokandić**

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

Sažetak

Ovim predavanjem obuhvaćen je cjelokupni postupak izrade doktorske disertacije na Građevinskom fakultetu u Zagrebu temeljem suradnje s međunarodnim institucijama ostvarenoj kroz dva znanstvena projekta. Dan je pregled akademskih boravaka u inozemstvu za vrijeme izrade disertacije, te mogućnosti sufinanciranja terenskog i eksperimentalnog istraživanja kroz aktivnosti projekta. Također, naglašene su i mogućnosti te prednosti pisanja disertacije na engleskom jeziku, kao podloge za međunarodnu prepoznatljivost doktoranda.

Ključne riječi: međunarodna suradnja, disertacija, akademski boravak, disertacija na engleskom jeziku

Doctoral dissertation based on international cooperation

Abstract

This lecture presents the preparation and defence of doctoral dissertation on Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, based on the cooperation with international scientific institutions within two projects. Multiple collaborations with international researchers during the PhD study of the candidate are reviewed, and the possibilities for co-funding of both field and laboratory experiments are outlined. Furthermore, the benefits of PhD dissertation written in English are discussed, as a foundation for international recognition.

Key words: International cooperation, doctoral dissertation, guest researcher, English based doctoral dissertation

**SAŽECI OBRANJENIH
DOKTORSKIH RADOVA**
rujan 2019. - srpanj 2020.

**Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju rujan 2019. - srpanj 2020.
(abecednim redom)**

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
2019. godina	
Geometrijsko oblikovanje propusta ugrađenih u lukobran u svrhu povećanja učinkovitosti izmjene mora dr.sc. Damjan Bujak	243
2020. godina	
Higrotermalno ponašanje ventiliranih teških ovojnica zgrada dr.sc. Marina Bagarić	244
Karakterizacija cementnih kompozita s letećim pepelom od drvene biomase dr.sc. Ivana Carević	245
Volumenske deformacije cementnih kompozita s recikliranim polimernim vlaknima iz otpadnih guma dr.sc. Martina Grubor	246
Probabilistic assessment of existing road bridges using bridge weigh-in-motion data (Probabilističko ocjenjivanje postojećih cestovnih mostova korištenjem mjerenja prometa u pokretu) dr.sc. Dominik Skokandić	247

dr.sc. Marina Bagarić

Životopis

Marina Bagarić rođena je 5. prosinca 1989. u Zagrebu. Završila je XV. gimnaziju u Zagrebu te 2008. upisala studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Nagrađena je Rektorovom nagradom i stručno se usavršavala na Ege Üniversitesi u Turskoj. Kroz studij bila je stipendistica Grada Zagreba. Diplomirala je 2013., nakon čega se zapošljava na Zavodu za materijale, a 2014. upisuje doktorski studij. Održava nastavu te vodi studente u izradi diplomskih radova. Također, sudjeluje u znanstveno istraživačkim projektima te u organizaciji međunarodnih konferencija. Područje njezinog rada čini energetska učinkovitost u zgradarstvu i higrotermalno ponašanje ovojnica zgrada. Objavila je tri znanstvena rada u časopisima i više od 20 konferencijskih radova. Građevinski fakultet nagradio ju je za znanstveni rad u ak. god. 2018./2019.

Mentor: Prof.dr.sc. **Ivana Banjad Pečur**

Datum obrane: 9. 7. 2020.

Naslov dokorskog rada

Higrotermalno ponašanje ventiliranih teških ovojnica zgrada

Sažetak

Poznavanje higrotermalnog ponašanja od ključne je važnosti za izgradnju trajnih, energetski visokoučinkovitih zgrada koje su sigurne od građevinskih šteta uzrokovanih vlagom te pružaju zdravu i ugodnu unutarnju klimu korisnicima. U ovom radu, razvijena je metodologija istraživanja higrotermalnog ponašanja inovativnog predgotovljenog teškog fasadnog panela, čija specifičnost leži u korištenju velikog postotka recikliranog građevnog otpada za proizvodnju betonskih slojeva panela te zračnom sloju s prirodno provjetravanim zrakom. Korištena metodologija sastoji se od tri razine koje se međusobno nadograđuju u jednu zaokruženu cjelinu: (i) razina materijala – laboratorijska ispitivanja higrotermalnih svojstava dvije vrste betona s recikliranim agregatom; (ii) razina elementa – uspostava sustava terenskog monitoringa higrotermalnog ponašanja predmetnog panela, koji čini elemente ovojnice jedne obiteljske kuće, u realnim uvjetima vanjskog okoliša i korištenja kuće. U sklopu ove razine razvijen je i numerički model panela, koji je nakon kalibracije eksperimentalnim podacima korišten za daljnje parametarske analize kako bi se istražila prikladnost panela za druga klimatska područja i usporedilo ponašanje s različitim fasadnim sustavima. Utvrđen je utjecaj prirodno provjetranog zraka na toplinsko ponašanje panela i njegovu osjetljivost na nepredviđene prodore vlage. Zadnju razinu čini (iii) razina cijele zgrade, kroz koju je istražen utjecaj masivnosti ovojnice na toplinsko ponašanje zgrade, kao i utjecaj ponašanja korisnika na potrošnju energije i ugodnost.

dr.sc. Damjan Bujak

Životopis

Damjan Bujak rođen je 1991. u Zagrebu. Diplomirao je 2015. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na kojem je 2019. obranio i disertaciju. Dobio je nagradu Hrvatskih voda za najbolji diplomski rad iz područja hidrotehnike, dekanove nagrade za izvrstan uspjeh u okviru diplomskoga studija i za rad Hidraulički slom tla na nizvodnoj strani nasipa. Godine 2019. položio je stručni ispit te je upisan u imenik ovlaštenih inženjera građevinarstva. Od 2015. do kraja 2016. godine bio je zaposlen na matičnom fakultetu kao stručni suradnik u Zavodu za hidrotehniku, gdje je 2017. zaposlen kao asistent na znanstvenom projektu Hrvatske zaklade za znanost. U dosadašnjem znanstvenom radu napisao je osam znanstvenih radova u časopisima i devet znanstvenih radova u zbornicima skupovima.

Mentor: Izv.prof.dr.sc. **Dalibor Carević**

Datum obrane: 15. 11. 2019.

Naslov doktorskog rada

Geometrijsko oblikovanje propusta ugrađenih u lukobran u svrhu povećanja učinkovitosti izmjene mora

Sažetak

Narušena kvaliteta mora unutar luke može se izbjeći smanjenjem potencijalnih izvora onečišćenja ili/ održavanjem optimalne izmjene mora. U područjima gdje su amplitude plimnih oscilacija unutar kategorije mikroklimnih mijena poput Jadranskoga mora, uobičajena je ugradnja grupe propusta u tijelo lukobrana za poboljšanje izmjene mora. Uz povoljan utjecaj grupe propusta, izražen kroz povećanu izmjenu mora u akvatoriju, javlja se nepoželjna transmisija valne energije kroz grupu propusta. Laboratorijskim i numeričkim ispitivanjima, koristeći se modelom grupe propusta na koji nailaze valovi, istražila se transmisija valne energije i protok uslijed valova. Terenskim i numeričkim ispitivanjima otkrio se dominantni generator izmjene mora kroz grupu propusta za lokaciju ACI marina Opatija (plimne oscilacije) i istražio utjecaj oblikovanja grupe propusta na brzinu protjecanja mora. Uzimajući u obzir parametar učinkovitosti grupe propusta u ostvarenju kompromisa između dvaju oprečnih djelovanja, mogu se odrediti najpovoljniji oblici grupe propusta ovisno o oceanografskim prilikama na lokaciji. U slučaju da su valovi dominantni generator cirkulacije, grupa propusta od četiri kružna propusta u jednom redu pokazala se najučinkovitijom. Grupa propusta od osam kružnih propusta u dva reda dolazi do izražaja u slučajevima kada je srednja valna klima relativno mala, i tada plimne oscilacije dominantno čine cirkulaciju. Stoga, povoljan oblik grupe propusta koji zadovoljava kriterij učinkovitosti moguće je definirati bez obzira na uvjete na pojedinoj lokaciji. Znanstveni doprinosi uključuju utvrđivanje matematičkih obrazaca za predviđanje koeficijenta transmisije valne energije i volumena koji protječe kroz propust pomoću podataka o valnim parametrima i geometrijskim karakteristikama propusta i definiranje povoljnih geometrijskih oblika i visinskih pozicija propusta s obzirom na razinu mora u svrhu optimiziranja oprečnih funkcionalnih zahtjeva propusta.

dr.sc. Ivana Carević

Životopis

Ivana Carević rođena je 1983. u Zagrebu. Osnovnu školu završila je u Svetom Ivanu Zelini, kao i srednju školu Dragutina Stražimira koju je završila 2002. g. Iste godine upisuje Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirala je 2009. g. završivši Sveučilišni diplomski studij, usmjerenje Hidrotehnika te stekla naziv diplomirani inženjer građevinarstva. Nakon završetka diplomskog studija zapošljava se na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Ispitivanja za potrebe doktorskog rada provela je u sklopu projekta „Transformation of Wood Biomass Ash into Resilient Construction Composites - TAREC²” voditeljice prof. dr. sc. Nine Štirmer. Objavila je niz znanstvenih i stručnih radova u koautorstvu te joj je Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu dodijelio nagradu za objavljeni znanstveni rad u akademskoj godini 2018./2019.

Mentor: Prof.dr.sc. **Nina Štirmer**

Datum obrane: 3. 6. 2020.

Naslov doktorskog rada

Karakterizacija cementnih kompozita s letećim pepelom od drvene biomase

Sažetak

Rastući trend korištenja drvene biomase kao obnovljivog izvora energije rezultira porastom količina proizvedenog pepela od drvene biomase (PDB) što uključuje i leteći pepeo i pepeo iz dna peći. Građevinski sektor predstavlja jedno od mogućih rješenja održivog gospodarenja PDB-om. Istraživanje doktorskog rada usmjereno je na primjenu letećeg PDB-a kao novog sporednog cementnog materijala u cementnim kompozitima. Dosadašnjim pregledom literature, uočeno je da su uglavnom korišteni empirijski eksperimentalni pristupi korištenja letećeg PDB-a u cementnim kompozitima, s fokusom na makroskopski učinak. Čak i uz zadovoljavajuće rezultate, ovim pristupom dobiva se fragmentirano razumijevanje novog potencijalnog materijala u građevnoj industriji bez jasnih zaključaka i preporuka za praksu. Cilj istraživanja bio je provesti sveobuhvatno ispitivanje korištenja letećeg pepela od drvene biomase u svrhu ocjene primjenjivosti takvih pepela u cementnim kompozitima. U sklopu istraživanja prikupljeno je 10 letećih PDB-a iz različitih energana u Republici Hrvatskoj te je napravljena analiza fizikalnih (raspodjela veličine čestica, gustoća čestica i morfologija) i kemijskih svojstava (kemijski sastav i udio teških metala, mineraloški sastav i gubitak žarenjem). Na osnovi fizikalnih i kemijskih svojstava predložena je valorizacija prikupljenih PDB-ova kao mineralnog dodatka gdje su odabrani leteći PDB-ovi za izradu i ispitivanje svojstava u svježem i očvrnulom stanju cementnih kompozita (pasta i mortova). Metodom eluiranja/izluživanja provedena je provjera koncentracije i pokretljivosti štetnih elemenata u cementnim kompozitima s letećim PDB-om. Dodatno je provedena termogravimetrijska analiza (TGA) kako bi se odredila stabilnost letećeg PDB-a kada je skladišten u zatvorenim uvjetima, te na zraku, ali izložen sobnoj vlazi u različitim starostima uzoraka. Za potrebe ispitivanja reaktivnosti letećeg PDB-a odabrana je direktna metoda tzv. Frattini test i indirektna metode (indeks aktivnosti preko tlačne čvrstoće, promjena električne vodljivosti). Osnovni doprinos istraživanja je kvantificiranje prihvatljivog udjela letećeg PDB-a u cementnim kompozitima uključujući karakterizaciju letećeg PDB-a te definiranje utjecaja pojedinih letećih PDB-ova na mehanička svojstva i svojstva trajnosti cementnih kompozita.

dr.sc. Martina Grubor

Životopis

Martina Grubor rođena je 1987. u Slavonskom Brodu, gdje je pohađala osnovnu i srednju školu. Diplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Materijali, završava 2012. godine, a diplomski studij na Ekonomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Menadžment, 2015. godine. Od 2013. godine radi u poduzeću EZ Enginering d.o.o. u Zadru kao projektant u području strojarstva i elektrotehnike. U travnju 2014. godine zapošljava se na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu gdje sudjeluje u izvođenju znanstveno istraživačkih projekata i nastave na predmetima preddiplomskog i diplomskog studija. Poslijediplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu upisuje 2014. godine. Disertaciju je obranila u lipnju 2020. godine. Bavi se problematikom održivih cementnih kompozita te razvojem novih mjernih metoda za istraživanje cementnih kompozita. Objavila je 4 znanstvena rada u časopisima, 9 znanstvenih radova na konferencijama te kao neposredni voditelj sudjelovala u izradi 8 diplomskih i završnih radova te dva rada nagrađena Rektorovom nagradom. Za 2 znanstvena rada objavljena u koautorstvu u akademskoj godini 2017./2018. primila je nagrade od Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor: Prof.dr.sc. **Nina Štirmer**

Datum obrane: 5. 6. 2020.

Naslov doktorskog rada

Volumenske deformacije cementnih kompozita s recikliranim polimernim vlaknima iz otpadnih guma

Sažetak

Volumenske promjene cementnih kompozita započinju neposredno nakon ugradnje, pri čemu promjene koje se dogode u prvih 24 sata starosti kompozita mogu imati značajan utjecaj na svojstva u očvrslom stanju. Naime, volumenske deformacije u ranoj starosti, ponajprije autogene deformacije i plastično skupljanje, uzrokuju nastanak mikropukotina u cementnim kompozitima koje se tijekom eksploatacije mogu povećati/proširiti, a time dovesti do većeg rizika prodiranju agresivnih tvari iz okoliša u mikrostrukturu kompozita. Jedna od poznatih strategija smanjenja volumenskih deformacija je uporaba polipropilenskih vlakana (PP vlakna). Ovim istraživanjem utvrđena je mogućnost zamjene industrijskih PP vlakana s recikliranim polimernim vlaknima iz otpadnih guma (RTPF vlakna) s posebnim naglaskom na volumenske deformacije u ranoj starosti. Dokazano je da su upotrebom RTPF vlakana volumenske deformacije dodatno smanjene čime se dobiva beton poboljšanih svojstava. Istražene su nove vrste cementnih kompozita s RTPF vlaknima te su definirane zakonitosti ponašanja volumenskih deformacija cementnog kompozita ovisno o stupnju pročišćenja RTPF vlakana. Definirane su optimalne količine RTPF vlakana u sastavu samozbijajućeg betona kako bi se smanjile volumenske deformacije. Na osnovi dobivenih eksperimentalnih rezultata razvijen je model autogenih deformacija s dodatkom RTPF vlakana u ranoj starosti. Ovim istraživanjem se pokazalo da otpadne gume koje su veliki ekološki problem današnjice, sadrže visokovrijedne materijale čijom se upotrebom u cementnim kompozitima mogu postići proizvodi dodane vrijednosti, odnosno upotrebom RTPF vlakana može se doprinijeti projektiranju i građenju trajnijih građevina sa smanjenim troškovima održavanja, smanjivanju emisije CO₂ te doprinijeti očuvanju prirodnih resursa.

dr.sc. Dominik Skokandić

Životopis

Dominik Skokandić rođen je 1989. u Dubrovniku, a osnovnu i srednju školu završio je u Korčuli. Na Građevinskom fakultetu u Zagrebu 2010. završava preddiplomski, a 2013. i diplomski studij, smjer Konstrukcije. Od 2013. zaposlen je u projektnom uredu gdje radi kao projektant te suradnik nadzornog inženjera. Od 2014. započinje se kao asistent na Zavodu za konstrukcije matičnog fakulteta, gdje sudjeluje u obavljanju nastave, provedbi znanstvenih projekata te stručnim poslovima u projektiranju. Godine 2014. upisuje doktorski studij na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, smjer Inženjerske konstrukcije, kojeg završava 2020. godine obranom disertacije pod mentorstvom prof. Ane Mandić Ivanković. Kao znanstvenik boravio je na više međunarodnih institucija, među kojima i mjesec dana na danskom tehničkom sveučilištu (DTU). Objavio više od 10 znanstvenih i stručnih radova.

Mentor: Prof.dr.sc. **Ana Mandić Ivanković**

Datum obrane: 29. 4. 2020.

Naslov doktorskog rada

Probabilistic assessment of existing road bridges using bridge weigh-in-motion data (Probabilističko ocjenjivanje postojećih cestovnih mostova korištenjem mjerenja prometa u pokretu)

Sažetak

U disertaciji se obrađuje problematika ocjenjivanja postojećih cestovnih mostova, a glavni cilj je definirati praktičnu, inovativnu i djelotvornu metodu ocjenjivanja postojećih takvih mostova koja se temelji na korištenju podataka dobivenih mjerenjem prometa na mostu u pokretu (B-WIM mjerenja). Osnovna pretpostavka i hipoteza disertacije je da se korištenjem podataka dobivenih sustavom B-WIM te probabilističkim pristupom mogu otkriti skrivene rezerve u nosivosti mostova i time omogućiti dulji vijek njihove uporabe. Disertacija je podijeljena u 9 poglavlja, od kojih se u poglavljima 2 do 6 opisuje razvitak nove metode ocjenjivanja, dok je u poglavlju 7 napravljena analiza isplativosti metode korištenjem cost-benefit analizu te analizu vrijednosti dodatnih B-WIM podataka (Vol analiza). Nova metoda primijenjena je na dva stvarna mosta koji su odabrani u skladu sa najčešćim karakteristikama mostova na TEN-T cestama u Europi, na kojima je analiza provedena i postupkom za projektiranje novih mostova kako bi se dobila referentna (inicijalna) razina pouzdanosti. Usporedba dobivenih rezultata najbolje dokazuje učinkovitost nove metode kroz povećanje indeksa pouzdanosti od preko 100 %. Ekonomska isplativost definirane metode dokazana je cost-benefit i Vol analizom na primjeru oba mosta. Znanstveni doprinosi disertacije očituje se kroz: 1) potvrdu iskoristivosti implementacije B-WIM mjerenja u postupak ocjene stanja postojećih mostova, 2) razvitak nove metode ocjenjivanja u više razina i 3) dokaz o ekonomskoj učinkovitosti definirane metode cost-benefit analizom.

DOI: 10.5592/CO/PhDSym.2020

ISBN 978-953-8168-42-0

